

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Měření základních charakteristik plunžrového čerpadla na
demonstračním zařízení Armfield FM53**

**Measurement of the Plunger Pump Characteristics on the Armfield
FM53 Demonstration Unit**

Student:

Jiří Navrátil

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Sylva Drábková Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student:

Jiří Navrátil

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

Téma:

Měření základních charakteristik plunžrového čerpadla na
demonstračním zařízení Armfield FM53
Measurement of the Plunger Pump Characteristics on the Armfield
FM53 Demonstration Unit

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je ověření funkce měřicího zařízení Armfield FM53 a návrh postupu pro vyhodnocení parametrů plunžrového čerpadla za různých podmínek.

1. Popište rozdělení hydrostatických čerpadel
2. Zpracujte popis funkce plunžrového čerpadla a jeho charakteristik
3. Popište měřicí zařízení Armfield FM53
4. Navrhněte postup pro vyhodnocení základních charakteristik plunžrového čerpadla
5. Proveďte měření parametrů čerpadla pro různé provozní podmínky
6. Vyhodnoťte základní charakteristiky plunžrového čerpadla

Seznam doporučené odborné literatury:

- MELICHAR, J., BLÁHA, J. *Problematika soudobé čerpací techniky*. Praha: ČVUT, 2007. 265 s. ISBN 978-80-01-03719-5.
- BLÁHA, J., BRADA, K. *Příručka čerpací techniky*. Praha: ČVUT, 1997. 289 s. ISBN 80-01-01626-9.
- BLÁHA, J.; BRADA, K. *Hydraulické stroje*. 1st edition Praha: SNTL, 1992. 747 s. ISBN 80-03-00665-1.
- BLEJCHAR, T., DRÁBKOVÁ, S.: *Čerpací technika a potrubí, návody do cvičení*. VŠB-TUO, Ostrava, 2010. 76 s. ISBN 978-80-248-2205-1
- VARCHOLA, M. *Hydrostatické čerpadlá*. 1. vydanie. Edičné stredisko SVŠT v Bratislave, 1988. 220 s.
- ZAVADIL, Lukáš. *Týmová cvičení z čerpací techniky*. Skripta FS VŠB – TU Ostrava, 2011. 128 s.
- BOLDIŠ, P. *Bibliografické citace podle dokumentů ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2, část 2 – Modely a příklady citací u jednotlivých typů dokumentů*. [online]. Datum poslední revize 11. 11. 2004. Dostupné z <<http://www.boldis.cz/citace/citace2.pdf>>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

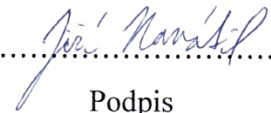
Ostrava dne 16. 5. 2014

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 16. 5. 2014


.....
Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jiří Navrátil

Adresa trvalého bydliště autora práce:

Kunín 174

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena do oblasti hydrostatických čerpadel. Obsahuje základní rozdělení čerpadel, s uvedením jejich předností i nevýhod, oblasti jejich použití a základních parametrů. Dále jsou zde zmíněny charakteristiky pístových a plunžrových čerpadel. Je zpracován přehled výrobců plunžrových čerpadel, včetně typů dodávaných na český trh a parametrů, kterými tato čerpadla disponují. V závěru práce je uveden popis a výsledky měření charakteristik plunžrového čerpadla na zařízení Armfield FM53.

Abstract

The Bachelor thesis is focused on hydrostatic pumps. It contains the basic distribution of pumps, indicating their advantages and disadvantages, their field of application and basic parameters. Are also mentioned here the characteristics of piston and plunger pumps. You can also read about the producers of plunger pumps, what types are available on the Czech market and what parameters these pumps have. In the end of the work there are description and results of measurements on the device Armfield FM53.

Klíčová slova

Hydrostatická čerpadla, Plunžrové čerpadlo, Měřicí zařízení Armfield FM53,

Základní charakteristiky.

Keywords

Hydrostatic pumps, Plunger pump, Plunger Pump Armfield FM53,

Basic characteristics.

Poděkování

Touto cestou bych chtěl rád poděkovat vedoucí své bakalářské práce paní doc. Ing. Sylvě Drábkové, Ph.D. za cenné rady, připomínky a za čas, který mi během společného měření a konzultací věnovala.

OBSAH

Obsah	8
Úvod	11
1 Co jsou to čerpadla.....	12
1.1 Hydrostatická čerpadla	12
1.2 Hydrodynamická čerpadla	13
1.3 Čerpadla pracující na jiném principu přeměny energie.....	13
1.1 Čerpadla s klikovým mechanismem	13
1.2 Plunžrové čerpadlo	13
1.3 Pístové čerpadlo	15
1.4 Hlavní části pístových čerpadel	15
1.5 Jednočinné pístové čerpadlo	16
1.6 Dvojčinné pístové čerpadlo	17
1.7 Diferenciální pístové čerpadlo	17
1.8 Čerpadlo zdvižné	18
1.9 Použití víceválcového čerpadla s rozdílným časováním	19
1.10 Parametry pístového i plunžrového čerpadla:	22
1.11 Charakteristiky hydrostatického čerpadla.....	24
2 Výrobci plunžrových čerpadel:	26
2.1 Vysokotlaká plunžrová čerpadla od výrobce Sigmet Olomouc	26
2.2 Vysokotlaká plunžrová čerpadla od výrobce Sigma Hranice.....	28
2.3 Vysokotlaká plunžrová čerpadla od výrobce AxFlow	29
2.4 Vysokotlaká plunžrová čerpadla společnosti UDOR	30
2.5 Vysokotlaká plunžrová čerpadla CAT společnosti Hennlich	32
3 Popis měřicího zařízení Armfield FM53	33
3.1 Popis demonstračního zařízení:.....	33
4 Problémy se zařízením FM53 Plunger Pump	35
5 Měření charakteristik plunžrového čerpadla na zařízení Armfield FM53	37
5.1 Důležité informace před měřením.....	37
5.2 Měření výstupních tlaků za různých otáček elektromotoru	37
5.2.1 Teorie.....	37
5.2.2 Postup měření	38
5.2.3 Výsledky prvního měření.....	38
5.3 Měření P-V charakteristiky	40
5.3.1 Teorie.....	40
5.3.2 Postup měření	41
5.3.3 Výsledky druhého měření.....	41
5.4 Výpočet objemové účinnosti	43

5.4.1	Teorie.....	43
5.4.2	Postup měření	44
5.4.3	Výsledek třetího měření.....	44
Závěr		47
Seznam obrázků		49
Seznam tabulek a grafů		50
Seznam použité literatury / zdroje.....		51

Seznam použitých veličin

A	Mechanická práce	[J]
D	Průměr pístu	[mm]
f	Frekvence	[Hz]
h	Výška	[m]
M	Krouticí moment	[Nm]
n	Otáčky	[s ⁻¹]
P	Příkon	[W]
p	Tlak	[Pa]
p_c	Tlak na válci	[Pa]
P_h	Hydraulický výkon	[W]
p_o	Tlak na výstupu	[Pa]
Q_v	Objemový průtok	[m ³ .s ⁻¹]
r	Poloměr pístu	[mm]
s	Poloha plunžru	[mm]
S_p	Plocha pístu	[mm ²]
t	Čas	[s]
T	Teplota, perioda	[°C; s]
V	Objem	[m ³]
V_g	Geometrický objem	[m ³]
Y	Měrná energie	[J.kg ⁻¹]
η_o	Objemová účinnost	[%]
ρ	Měrná hmotnost	[kg.m ⁻³]
ω	Úhlová rychlost	[s ⁻¹]

ÚVOD

Obsah této bakalářské práce by měl čtenářům poskytnout základní informace ohledně rozdělení hydrostatických čerpadel s přímočarým vratným pohybem pracovního prvku, detailnější seznámení s pístovými a plunžrovými čerpadly, oblastí jejich využití, základními charakteristikami, seznamem aktuálních výrobců a v neposlední řadě uplatněním v technické praxi.

Úvodní kapitola je stručným uvedením do problematiky čerpadel. Jsou zde popsány rozdíly mezi čerpadly pístovými a plunžrovými, z jakých částí se skládají, na jakém principu pracují a jaké jsou jejich základní charakteristiky. Dále jsou zde uvedeny výpočty parametrů a charakteristiky průtoků při použití jedno či více pístového čerpadla.

V druhé kapitole je podrobnější popis výrobců plunžrových čerpadel, jsou zde vypsány všechny hlavní typy plunžrových čerpadel, v jakých odvětvích průmyslu jsou využívány a jsou zde uvedeny jejich maximální průtoky při daných maximálních otáčkách.

Třetí kapitola je věnována detailnímu popisu demonstračního zařízení Armfield FM53, které slouží k měření základních charakteristik plunžrového čerpadla. Jsou zde popsány jednotlivé díly celého zařízení a způsob komunikace s pracovním počítačem.

Čtvrtá a pátá kapitola je zaměřena na návrh a měření parametrů čerpadla pro různé provozní podmínky, jsou uvedeny problémy, které se během měření vyskytly a jaké byly následné postupy, abychom docílili správných výsledků. V závěru bakalářské práce je vyhodnocení všech základních charakteristik, který bylo možno měřit na demonstračním zařízení.

1 CO JSOU TO ČERPADLA

Čerpadlo (také pumpa nebo hydrogenerátor) je zařízení, které dopravuje tekutiny (kapaliny nebo plyny) nebo také kaly pomocí mechanické práce. Čerpadla pracují pomocí určitého mechanismu (typicky vratným nebo rotačním pohybem) a spotřebovávají energii k provádění mechanické práce pohybem tekutiny. Čerpadla pracují pomocí mnoha energetických zdrojů, včetně ruční práce, elektřiny, motorů nebo pomocí větrné energie. Vyrábějí se ve velkém spektru velikostí. Od mikroskopických používaných v lékařských zařízeních až po velká průmyslová čerpadla.

Mechanická čerpadla slouží v široké škále aplikací, jako je čerpání vody ze studní, filtrování a provzdušňování rybníku, v automobilovém průmyslu, pro chlazení vodou a vstřikování paliva, v energetice pro čerpání ropy a zemního plynu nebo na provoz chladících věží. V lékařském průmyslu se používají pro biochemické procesy ve vývoji a výrobě léků a jako náhrada za umělé části těla, zejména umělé srdce a penilní protézy. [1],[11]

1.1 Hydrostatická čerpadla

Charakteristickým rysem u této skupiny čerpadel je přeměna mechanické energie přímo na tlakovou energii kapaliny. Posuvným nebo rotačním pohybem činného prvku přemísťují určitý geometrický objem kapaliny. Proto se jim říká čerpadla objemová. Hlavní kritérium, podle kterého dále hydrostatická čerpadla dělíme, je způsob pohybu funkční části.

1) čerpadla s kmitavým pohybem funkční části

- pístová, plunžrová, membránová, vlnovcová, křídlová

2) čerpadla s otáčivým pohybem

- zubová, věténová, lamelová, s rotujícími písty, hadicová

1.2 Hydrodynamická čerpadla

Tato skupina čerpadel se vyznačuje přeměnou mechanické energie na energii kinetickou, která se následně mění na energii tlakovou. Podle tohoto principu činnosti jsou dvojího typu:

- lopatková (radiální – odstředivá, diagonální, axiální – vrtulová)
- proudová (injektory)

1.3 Čerpadla pracující na jiném principu přeměny energie

- trkače (pracují s přerušovaným proudem kapaliny, při přerušení proudu využívají energetického rázu)
- mamutová (ke svému chodu používají stlačený vzduch, čili kapalina je vynášena přiváděným vzduchem)
- elektromagnetická (vhodná pro dopravu nebezpečných kapalin, dopravují elektricky vodivé kapaliny působením elektromagnetického pole)
- zdvižná (jsou vhodná při dopravě vody z hlubších studní, přepravují kapalinu mechanickým zvedáním kapaliny, buď přerušovaně, nebo nepřerušovaně, řadí se mezi ně čerpadla řetězová, korečková, šneková či zvedací kola)

1.4 Čerpadla s klikovým mechanismem

Jedná se o technická zařízení s klikovým mechanismem, umožňují změnu otáčivého pohybu na přímočarý vratný pohyb nebo obráceně přímočarý vratný na otáčivý pohyb. Řadíme mezi ně plunžrové a pístové čerpadla.

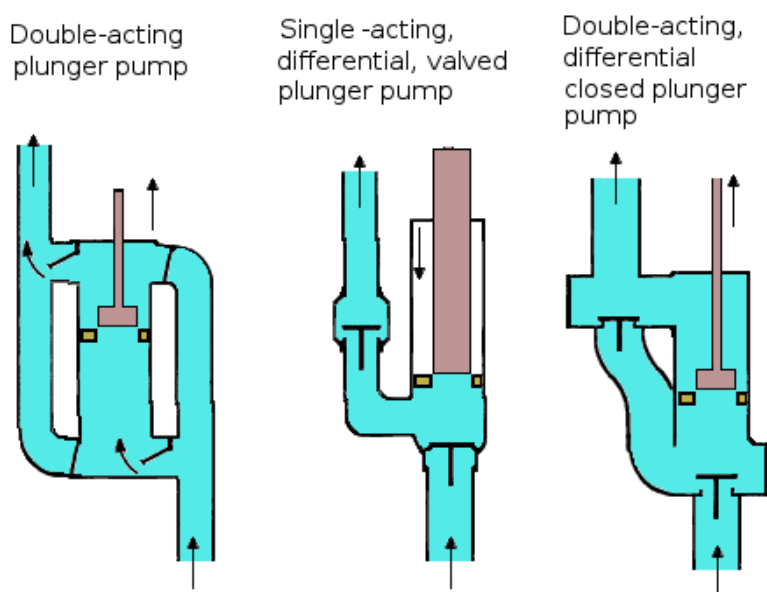
1.5 Plunžrové čerpadlo

Toto čerpadlo, které se někdy označuje jako vysoko-viskózní, je svou konstrukcí podobné čerpadlu pístovému, avšak místo pístní tyče a pístu se zde nachází jedna součást – plunžr. Konstrukce stroje bývá většinou jednočinná, popřípadě i ve dvojčinné verzi. Jedná se o typ objemového čerpadla, které má vysokotlaké těsnění stacionární a hladký válcový plunžr klouže skrz těsnění. To je dělá odlišnými od pístových čerpadel a umožňuje jim pracovat při vyšších tlacích.

Tento typ čerpadla je často používán k přenosu komunálních a průmyslových vod. Nerezová ocel se běžně používá v komoře u plunžru v potravinářském, farmaceutickém a chemickém průmyslu. Komora může být posléze snadně sterilizována po průchodu živočišného odpadu nebo chemikálií. Je-li čerpadlo používáno u pobřežních ropných plošin, je ocelový píst nahrazen keramickým, kvůli zabránění korozi od slané vody. Jejich předností je provozní spolehlivost, dlouhá životnost díky robustní konstrukci a příznivé provozní náklady. [2], [3]

Použití:

- Vysokotlaké čištění (potrubních rozvodů, kanalizačních systémů, filtrací, výměníků tepla, zásobních nádrží, vozidel či hlubokých vrtů)
- Při procesu reversní osmózy
- K vysokotlakému ostříku okují ve válcovných plechů
- Jako pohony hydraulických lisů a vstřikovacích lisů ve slévárnách
- K napájení parních kotlů
- Vysokotlaké chlazení a mazání obráběcích strojů
- Sanace betonových konstrukcí
- Vysokotlaké statické zkoušky technologických zařízení
- Zdroj tlakové vody pro zasněžovací zařízení či plnění zásobníků na oxid uhličitý
- Vysokotlaké hasicí zařízení



Obrázek 1 - Typy plunžrových čerpadel: dvojčinné, jednočinné diferenciální
a dvojčinné diferenciální [1]

1.6 Pístové čerpadlo

Hlavním charakteristickým znakem pístových čerpadel je převod rotačního pohybu na přímočarý. Pístová čerpadla jsou (podobně jako plunžrová) vhodná pro čerpání menších objemů kapalin za působení vyšších tlaků. Dochází k přeměně mechanické energie na energii tlakovou za pomoci klikového mechanismu. Klikový mechanismus může být zkrácený nebo nezkrácený. Zkrácený klikový mechanismus nemá tzv. křížák, což znamená, že jeho funkci přebírá píst, který proto není kotoučový, ale trubkový popřípadě plunžrový. [12]

Druhý pístových čerpadel

- Jednočinná pístová čerpadla
- Dvojčinná pístová čerpadla
- Diferenciální čerpadla
- Zdvížná pístová čerpadla

1.7 Hlavní části pístových čerpadel

Ventily

Existují různé druhy ventilů, které mohou být odvozeny například z tvaru uzavíracího elementu a to talířové, kolové, kuželové, prstencové, záklopkové apod. Často se používají samočinné, otevírané tlakem nebo pod tlakem kapaliny. Zpětný pohyb ventilu je vyvozen tíhovou silou uzavíracího elementu nebo pružinou. [12]

Vzdušníky

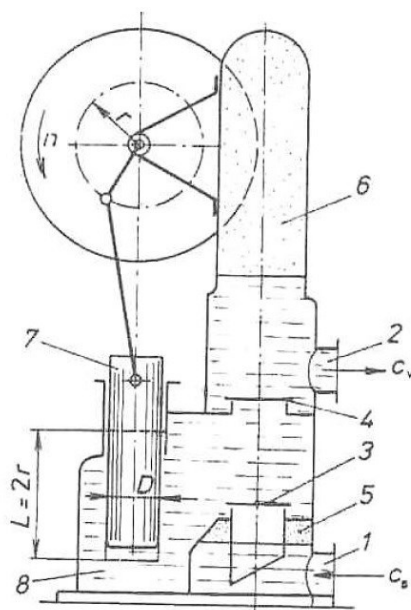
Tlakové nádoby, které vyrovnávají tlakové rázy kapaliny vycházející z čerpadla. Vzduch zde působí jako pružina. Čím je objem vzduchu nad hladinou kapaliny větší, tím jsou změny tlaku vzduchu menší a proudění kapaliny je rovnoměrnější. Při rovnoměrnějším výtlaku se zmírňují změny rychlosti ve výtlačném potrubí a také nestacionární proudění a rázy v potrubí. [12]

Sací koš

Sací koše zachytávají hrubé nečistoty, které se mohou nacházet v dopravované látce. Jeho průtočná plocha se udává třikrát až pětkrát větší než je světlý průřez sacího potrubí. Bývá vybaven zpětným ventilem, který umožňuje naplnění sacího potrubí kapalinou před spuštěním čerpadla. [12]

1.8 Jednočinné pístové čerpadlo

- Nasává a vytlačuje pracovní kapalinu pouze jednou stranou pístu.
- Hladký broušený píst prochází ucpávkou v tělese čerpadla.
- Při pohybu pístu vzhůru dojde samočinně k otevření sacího ventilu a kapalina se nasaje do pracovního prostoru. Při klesání pístu dojde vlivem přetlaku k uzavření sacího ventilu a otevře se ventil výtláčný. Nasátý objem kapaliny je vytlačován do výtláčného vzdušníku a odtud směřuje k výtláčnému hrdlu a dále do výtláčného potrubí.
- Setrvačnick vyrovnává nerovnosti při běhu čerpadla
- Výtláčný a sací vzdušník umožňuje vyrovnat nestejnoměrnosti během čerpání. Vzdušník je z části naplněn vzduchem, a proto může vyrovnat výkyvy tlaku při vytlačování.
- Kapalina vytéká potrubím ze vzdušníku stejnoměrně.



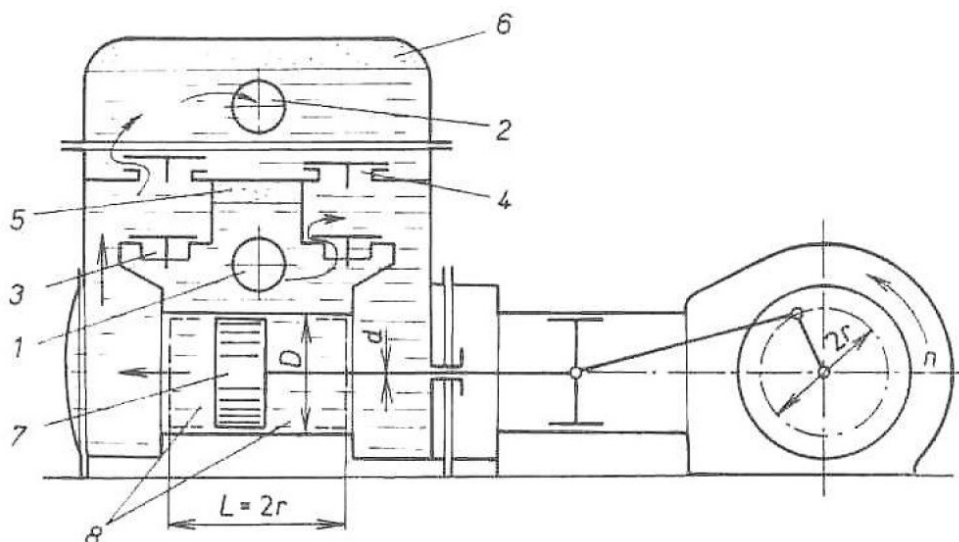
Obrázek 2 - Jednočinné pístové čerpadlo [16]

Popis čerpadla:

1 - Sací hrdlo, 2- Výtlačné hrdlo, 3- Sací ventil, 4- Výtlačný ventil, 5 - Sací vzdušník,
6 -Výtlačný vzdušník, 7 – Píst, 8 - Pracovní prostor

1.9 Dvojčinné pístové čerpadlo

- Má 2 pracovní prostory se čtyřmi ventily, dva sací a dva výtlačné
- Nasává a vytlačuje oběma stranami
- Oproti čerpadlu jednočinnému má stejnoměrnější běh a nepotřebuje tak velký setrvačnick
- Vzdušník je menší [12]



Obrázek 3 - Dvojčinné pístové čerpadlo [16]

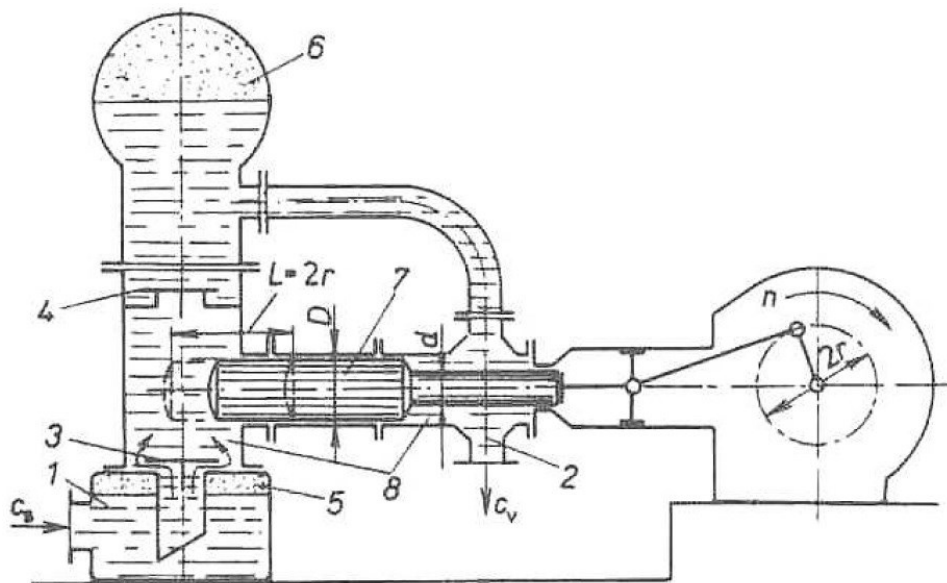
Popis čerpadla:

1 - Sací hrdlo, 2 - Výtlačné hrdlo, 3 - Sací ventil, 4 - Výtlačný ventil, 5 - Sací vzdušník,
6 - Výtlačný vzdušník, 7 – Píst, 8 - Pracovní prostor

1.10 Diferenciální pístové čerpadlo

- Nasává kapalinu jako čerpadlo jednočinné, ale vytlačuje ji při obou zdvizech
- Část nasáté kapaliny se při sacím zdvihu vytlačuje, zbytek protéká na druhou stranu pístu a vytlačuje se při sacím zdvihu.

- Síla působící na píst je při obou zdvizech přibližně stejná, poloviční než u čerpadla jednočinného
- Diferenciální čerpadlo má pro stejný objemový průtok menší rozměry než jednočinné čerpadlo
- Má jednodušší konstrukci než u čerpadla dvojčinného, a to menší počet ventilů, ale vyrovná se mu stejnoměrností dodávané kapaliny
- Objemový průtok je stejný jako u čerpadla jednočinného [12]



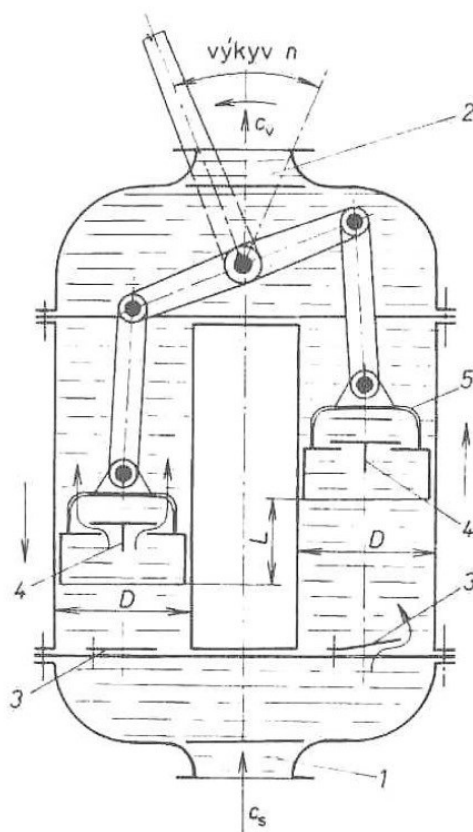
Obrázek 4 - Diferenciální čerpadlo [16]

Popis čerpadla:

- 1 - Sací hrdlo, 2 - Výtlačné hrdlo, 3 - Sací ventil, 4 - Výtlačný ventil, 5 - Sací vzdušník,
6 - Výtlačný vzdušník, 7 – Píst, 8 - Pracovní prostor

1.11 Čerpadlo zdvižné

- Výtlačný ventil je umístěn v pístu
- Kapalina je při nasátí přetlačována z prostoru pod pístem nad něj
- Při sacím zdvihu se kapalina pomocí pístu zdvihá k výtlačnému hrdlu
- Objemový průtok je přibližně stejný jako u jednočinného čerpadla [12]



Obrázek 5 - Schéma zdvižného čerpadla [16]

Popis čerpadla:

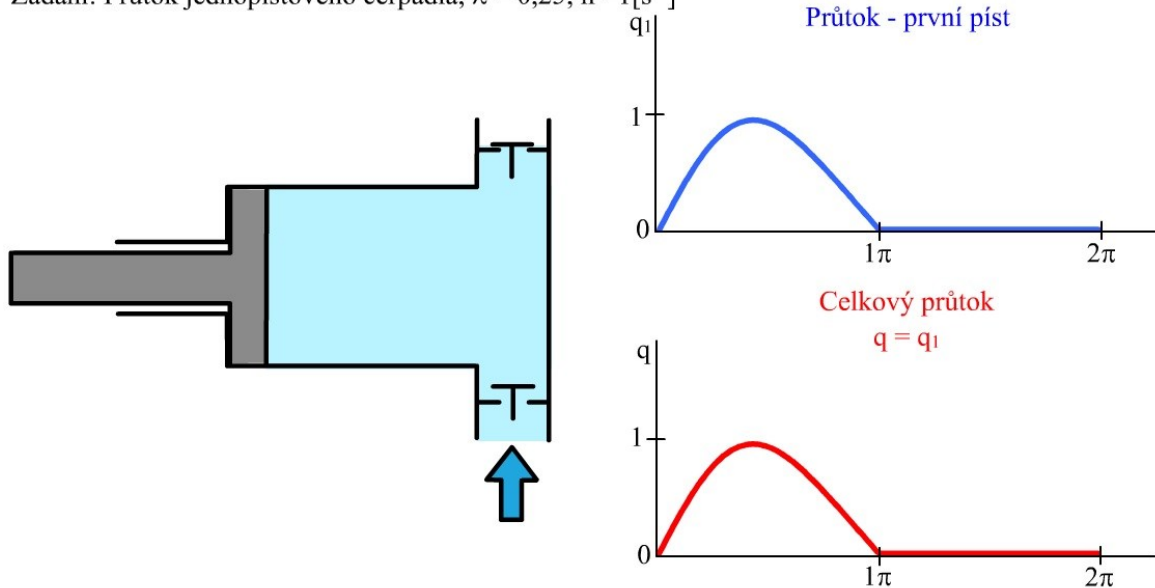
1 - Sací hrdlo, 2 - Výtlačné hrdlo, 3 - Sací ventil, 4 - Výtlačný ventil, 5 - Píst

1.12 Použití víceválcového čerpadla s rozdílným časováním

Plunžrová a pístová čerpadla se vyrábějí s různým počtem válců, od jednoho až po 9, s tím, že se optimálně volí lichý počet válců. Je to z důvodu vyhlazení průtoku, dojde tím také ke snížení negativního pulzačního tlaku a snížení odchylky točivého momentu na hřídeli. Nevýhodou jednopístového čerpadla je jeho neefektivita. Pracuje pouze v první periodě, kde dochází k výtlaku kapaliny, kdežto v druhé periodě pouze kapalinu nasává. Dvoupístové čerpadlo kombinuje předchozí variantu, čili když jeden píst kapalinu vytlačí, druhý píst ji mezitím nasává a po uběhnutí periody se jejich role vymění. Takto dojde k plynulejšímu průtoku, viz obrázek č. 7.

Jednopístové čerpadlo

Zadání: Průtok jednopístového čerpadla, $\lambda = 0,25$; $n = 1[\text{s}^{-1}]$

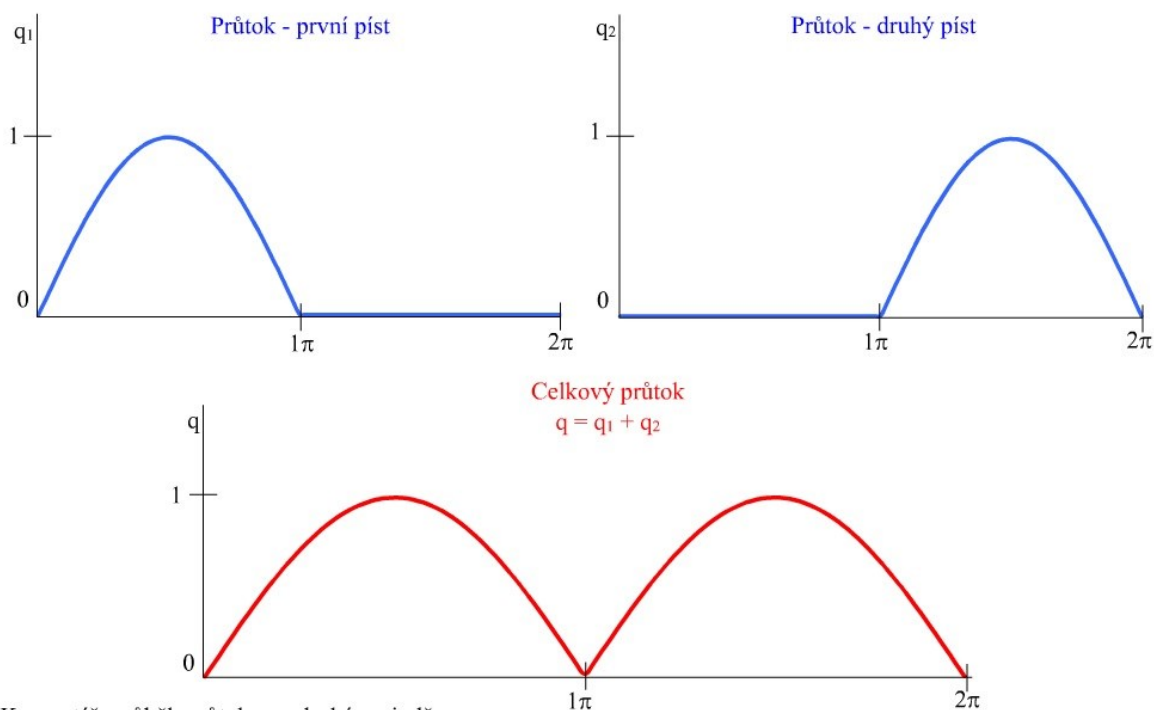


Komentář: fáze sání v první periodě

Obrázek 6 - Charakteristika jednopístového čerpadla [14]

Dvoupístové čerpadlo

Zadání: Průtok dvoupístového čerpadla, $\lambda = 0$; $n = 1[\text{s}^{-1}]$



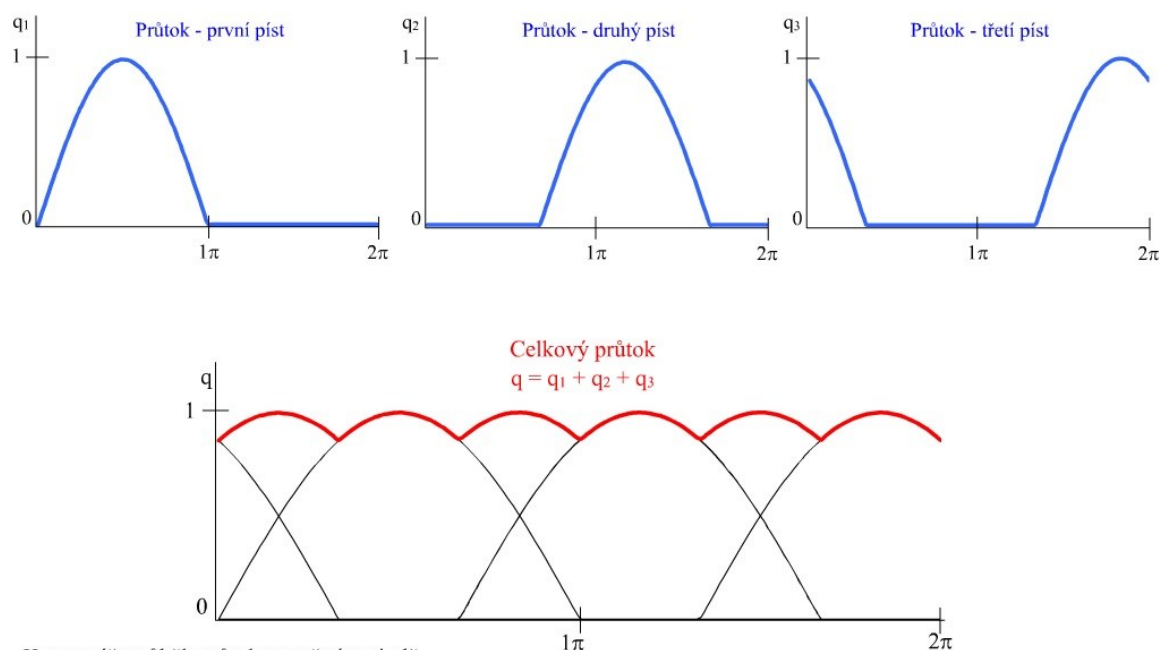
Komentář: průběh průtoku ve druhé periodě

Obrázek 7 - Charakteristika dvoupístového čerpadla [14]

U třípístového čerpadla je průběh průtoku plynulejší, než u dvoupístového čerpadla. Vyhlazenější charakteristiku vytvoří pohyb tří pístů s časovým zpožděním. Fázový posun každého pístu je $2/3\pi$. Výsledný průtok tohoto čerpadla je pak plynulejší a nedochází ke kolísání hodnot průtoku jako u předchozích typů. Viz obrázek č. 8. U pětípístových, sedmípístových a více pístových čerpadel je celkový průtok ještě plynulejší.

Třípístové čerpadlo

Zadání: Průtok třípístového čerpadla, $\lambda = 0$; $n = 1[\text{s}^{-1}]$



Komentář: průběh průtoku ve třetí periodě

Obrázek 8 - Charakteristika třípístového čerpadla [14]

1.13 Parametry pístového i plunžrového čerpadla:

Zdvihový (geometrický) objem

$$V_g = Sl = \frac{\pi D^2}{4} l \quad [\text{m}^3]$$

Teoretický objemový tok jednočinného čerpadla

$$Q_{vt} = V_g \cdot n = Sl n = \frac{\pi D^2}{4} l n \quad [\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$$

Objemový tok jednočinného čerpadla, zmenšený o ztráty netěsností

$$Q_v = V_g n \eta_v = Sl n \eta_v = \frac{\pi D^2}{4} l n \eta_v \quad [\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$$

Objemová účinnost, v praxi bývá maximálně do 98%

$$\eta_v = \frac{Q_v}{Q_{vt}} \quad [\%]$$

Měrná energie dodaná kapalině

$$Y_{HS} = \frac{p}{\rho} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Mechanická práce konaná pístem

$$A = Fl = pSl = pV_g \quad [\text{J}]$$

Teoretický výkon HS čerpadla

$$P_{(HS)} = \rho Q_{vt} Y_{(HS)} = \rho V_g n \frac{p}{\rho} = V_g n p \quad [\text{W}]$$

Krouticí moment na hřídeli

$$M = \frac{P_{(HS)}}{\omega} = \frac{P_{(HS)}}{2\pi n} = \frac{V_g p n}{2\pi n} = \frac{V_g p}{2\pi} \quad [\text{N} \cdot \text{m}]$$

➤ Z toho vyplývá, že moment nezávisí na otáčkách

Při návrhu průměru pístu D se vychází z objemového průtoku

$$Q_v = V_g n \eta_v = S l n \eta_v = \frac{\pi D^2}{4} l n \eta_v$$

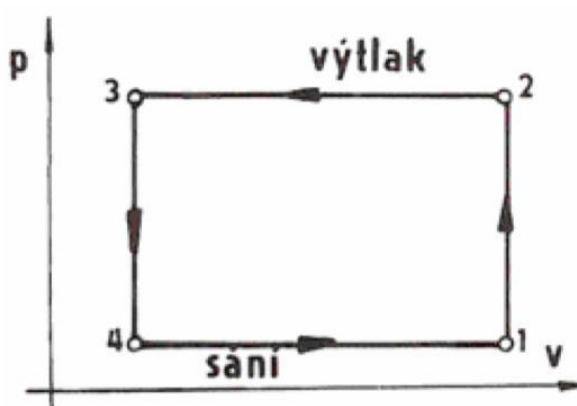
Pokud označíme poměr zdvihu a průměru pístu $\lambda = \frac{l}{D}$, můžeme vyjádřit $l = \lambda D$ a po dosazení do předchozí rovnice dostaneme

$$Q_v = \frac{\pi D^2}{4} l n \eta_v = \frac{\pi D^2}{4} \lambda D n \eta_v = \frac{\pi D^3}{4} \lambda n \eta_v$$

A odtud vyjádření průměru pístu

$$D = \sqrt[3]{\frac{4Q_v}{\pi \lambda n \eta_v}} \text{ [mm]}$$

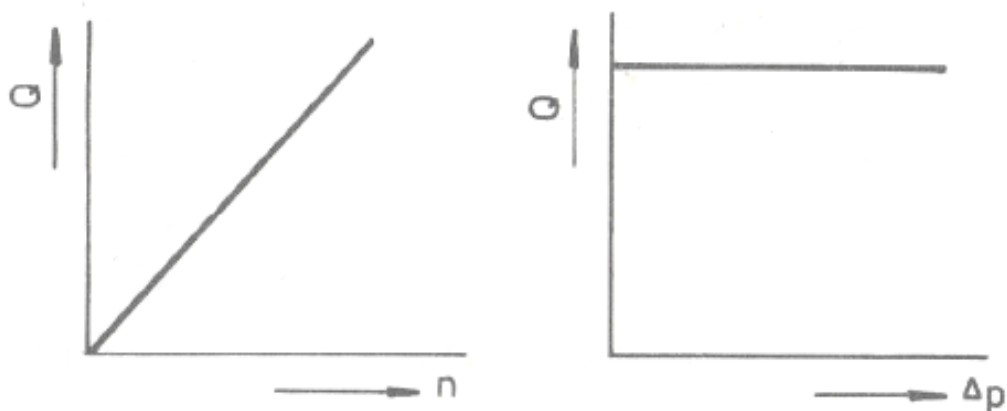
Pracovní cyklus u pístového i plunžrového čerpadla lze popsat pomocí p-V diagramu. Tento diagram má 4 charakteristické body. Na začátku sacího cyklu se píst (plunžr) pohybuje vpravo (4. bod), dochází k expanzi vzduchu a následným otevřením sacího ventilu kapalina zaplní objem válce. Až dosáhne píst spodní úvratě, dojde k uzavření sacího ventilu (1. bod) a nastává jev opačný – výtlač (2. bod). Poté se otevře výtlačný ventil a píst pomocí pohybu vlevo vytlačí kapalinu z pracovního prostoru. V bodě 3. se uzavře výtlačný ventil. [14]



Obrázek 9 – P-V diagram čerpadla [13]

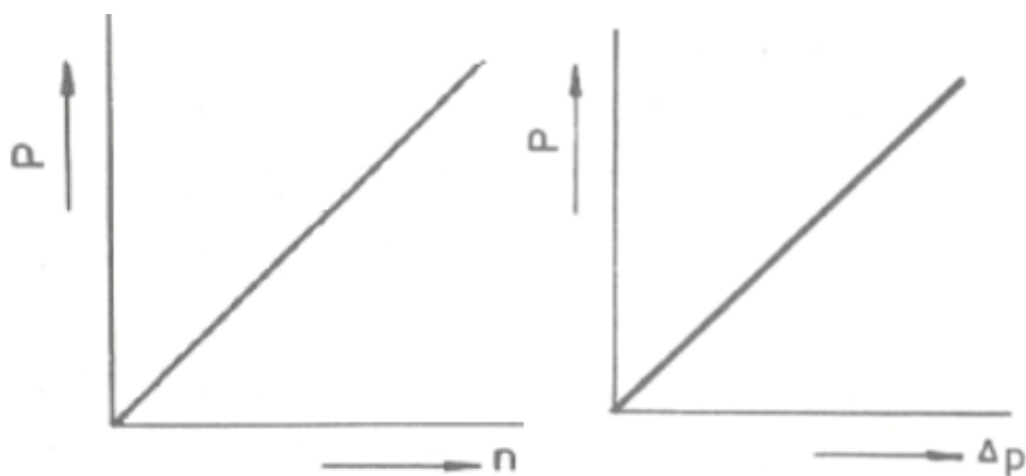
1.14 Charakteristiky hydrostatického čerpadla

Z uvedených ideálních charakteristik vyplývá, že průtok roste lineárně s otáčkami, ale je nezávislý na tlaku. [15]



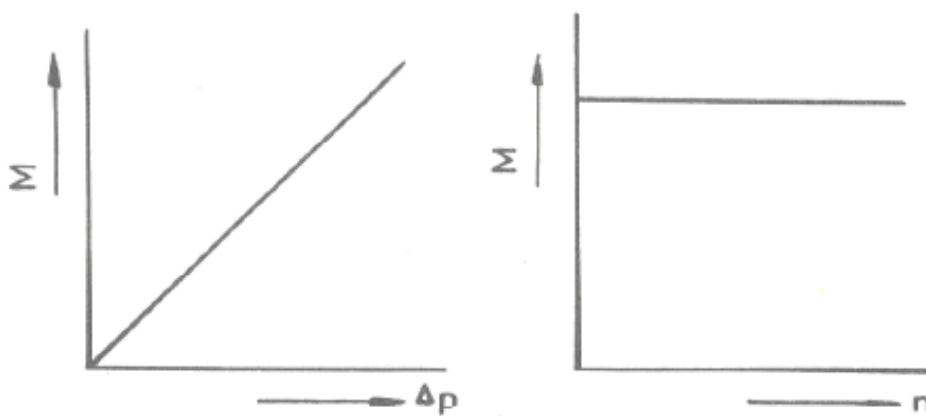
Obrázek 10 - Závislost průtoku na otáčkách a tlaku [14]

Výkon roste lineárně s otáčkami a tlakem.



Obrázek 11 - Závislost teoretického výkonu na otáčkách a tlaku [14]

Moment roste lineárně s tlakem, ale na otáčkách je nezávislý.



Obrázek 12 - Závislost momentu na otáčkách a tlaku [14]

2 VÝROBCI PLUNŽROVÝCH ČERPADEL:

Mezi významné výrobce plunžrových čerpadel, kteří mají působnost i na našem území, se řadí tyto firmy: Sigmat Olomouc, Sigma pumpy Hranice, AxFlow, UDOR a Hennlich. Je zde určitě mnoho jiných výrobců, ale v mé práci jsem se zaměřil výhradně na těchto pět.

2.1 Vysokotlaká plunžrová čerpadla od výrobce Sigmat Olomouc

Tato firma dodává nejen průmyslová čerpadla a čerpací stanice, ale také potrubní spojovací systémy, vývěvy, dmychadla, protipožární zařízení, elektromotory, převodovky, frekvenční měniče, míchadla, manometry, armatury a jiné zařízení na český trh. Odběrateli jsou především zákazníci v těžebním průmyslu, stavebnictví, energetice, zpracovatelském průmyslu a komunální sféře. [3]

Výrobce dělí svá plunžrová čerpadla do těchto řad:

- Řada P – pokrývají velké výkonové spektrum do 120 kW
- Řada NP – vhodné pro poměr cena / výkon
- Řada A – pro přímý pohon elektro nebo spalovacím motorem
- Řada K – tříplunžrová čerpadla přibližující se k 100% objemové účinnosti

V tabulce jsou uvedeny pouze základní typy čerpadel, podrobný výpis je uveden v katalogu výrobce. [3]

Typ	Max. průtok	Max. tlak	Max. teplota	Max. otáčky
	[l*min ⁻¹]	[bar]	[°C]	[min ⁻¹]
P11	3,1 - 14,7	60 - 200	70 - 105	750 - 1420
P21	5,1 - 28,3	60 - 450	70 - 105	750 - 1420
P31	19,2 - 42,5	60 - 220	70 - 105	750 - 1420
P41	33,7 - 67,7	80 - 250	70 - 105	750 - 1450
P45	37 - 123,1	80 - 400	60	1000
P50	66,8 - 93,8	80 - 110	70 - 105	570 - 800
P51	97,3 - 134,1	90 - 140	60	800
P52	12,8 - 98,3	120 - 1000	40 - 60	1000
P55	20,9 - 164	100 - 1000	60	750 - 1050
P62	48,5 - 175,9	120-420	60	800
P71	37,4 - 249,1	100 - 700	60	700 - 750
P80	110 - 400	140 - 500	30	580
P81	110 - 400	140 - 500	30	580

Tabulka 1 - Čerpadla Sigmet Olomouc 1/3

Typ	Max. průtok	Max. tlak	Max. teplota	Max. otáčky
	[l*min ⁻¹]	[bar]	[°C]	[min ⁻¹]
A11	9,4	100	70	2700
NP10	2,3-14,6	140	70	1450
NP16	13,9 - 20,8	140 - 280	70	1450 - 3450
NP25	19,9 - 69,7	170 - 400	70	1450

Tabulka 2 - Čerpadla Sigmet Olomouc 2/3

Typ	Max. průtok	Max. tlak [bar]		
	[l*min ⁻¹]	355 kW	400 kW	550 kW
K 55 000	95 - 2363	80 - 1950	90 - 2200	100 - 2470

Tabulka 3 – Čerpadla Sigmet Olomouc 3/3

Čerpadla jsou vhodná pro speciální dopravu látek jako:

- Bentonit
- Horkou vodu
- Mořskou vodu
- CO₂

2.2 Vysokotlaká plunžrová čerpadla od výrobce Sigma pumpy Hranice

Tato firma dodává čerpadla do evropských zemí, ale také do oblastí středního a blízkého východu a Asie. Zaměřuje se na dodávky čerpadel do těchto odvětví:

- Potravinářství, chemický a petrochemický průmysl, hutnictví, těžba surovin a těžké strojírenství

Značení dle typu:

- PAD, PAR, PAH, PAS, PAX, PCD, PCR, PCX

Tyto vysokotlaká horizontální plunžrová čerpadla jsou určena pro čerpání čisté vody, emulzí, olejů a jiných chemicky neaktivních kapalin a roztoků, s maximálním obsahem 1% objemová množství neabrazivních přímísenin s maximální velikostí zrna do 0.05mm a s teplotou v rozmezí (50-80)°C. Čerpadla jsou vhodná jako zdroj tlakového média v hydraulických obvodech tvářecích strojů, v tlakových stanicích, v zařízeních pro čisticí a sanační práce s vysokotlakým vodním paprskem nebo v mobilních zařízeních. Bližší informace jsou uvedeny v tabulce. [6]

Typ	Průtok (min - max)	Tlak (min - max)	Teplota média	Výkon
	[l*min ⁻¹]	[bar]	[°C]	[kW]
PAD	26 - 548	100 - 1000	50	105
PAH	79 - 7081	125 - 400	80	1475
PAR	33 - 655	100 - 800	60	115
PAS	45 - 420	250 - 500	50	175
PAX-3-100	17 - 358	170 - 1250	50	197
PAX-3-160	60 - 1715	140 - 1050	50	400
PAX-3-30	33,4 - 54	125 - 250	50	17
PAX-3-40	7,4 - 46	500 - 1000	50	41
PAX-3-60	26 - 182	320 - 1200	50	110
PCD	34,2 - 395,5	100 - 400	120	113
PCR	106 - 218	160 - 200	80	58
PCX	79,5 - 3206	125 - 400	120	668

Tabulka 4 - Čerpadla Sigma Hranice

2.3 Vysokotlaká plunžrová čerpadla od výrobce AxFlow

Společnost AxFlow vyrábí v České republice objemové a odstředivé čerpadla, jinak se v rámci Evropy zaměřuje na oblast dynamiky kapalin a čerpacích systémů. [5]

Výrobce dodává čerpadla do těchto odvětví průmyslu:

- Zemědělství, chemický a petrochemický průmysl, těžba surovin, potravinářství, papírenský průmysl, lisování plastů, ocelářský průmysl a jiné.

Jednotlivé modely plunžrových čerpadel nesou označení písmen D, M a Q. Základní vlastnosti uvedeny v tabulce.

Typ	Max. tlak	Max. průtok
	[bar]	[l*min ⁻¹]
D04	148,2	15,5
M06	689,5	121,1
M08	689,5	291,5
M12	689,5	522,3
M14	689,5	806,2
M16	689,5	1328,5
M18	689,5	1408
Q16	689,5	2214,2
Q18	689,5	2346,7
M28	689,5	3168
Q28	689,5	5280,1
Q32	689,5	6033,3
M40	551,6	2937,2
Q40	551,6	4894

Tabulka 5 - Čerpadla AxFlow

2.4 Vysokotlaká plunžrová čerpadla společnosti UDOR

Italská firma UDOR se zabývá výrobou membránových čerpadel a plunžrových čerpadel pro vysokotlaké mycí agregáty. Obchodním zástupcem pro tuto zahraniční firmu je společnost Tomoz, která vyrábí vysokotlaké agregáty.[8]

Jejich čerpadla jsou rozdělena do následujících kategorií:

- Řada P (PN , PK)
- Řada M (MK)
- Řada G (GK, GH)
- Řada CAR WASH
- Řada INOX / STAINLESS STEEL
- Řada NX
- Řada GAMMA (GAMMA-IL)
- Řada VX
- Řada PENTA

V tabulce jsou zobrazeny základní charakteristiky čerpadel, které vyrábí tato firma.

Typ	Max. průtok	Max. tlak	Výkon	Max. otáčky
	[l*min ⁻¹]	[bar]	[kW]	[min ⁻¹]
GB	21	200	11	1000
GC	21 - 34	170 - 200	7,9 - 11,3	1450
GD	20,8 - 32,2	200	7,8 - 12,1	1750
GKC	17 - 48	150 - 400	12,2 - 19,5	1450
GKD	17 - 26,5	280 - 350	14,9 - 20,4	1750
GHC	12,0 - 20	500	15,4 - 25,6	1450
GHD	11,5 - 16	500	14,7 - 20,5	1750

Tabulka 6 - Čerpadla UDOR 1/4

Typ	Max. průtok	Max. tlak	Výkon	Max. otáčky
	[l*min ⁻¹]	[bar]	[kW]	[min ⁻¹]
PNC	4,0 - 13	100 - 170	0,7 - 3,7	1450
PND	7,6 - 15	140 - 170	2,7 - 5,4	1750
PNE	8,0 - 13	120 - 150	2,1 - 3,7	2800
PNL	7,6 - 13,2	140 - 170	2,0 - 3,7	3400
PKC	10 - 15	150 - 200	3,5 - 4,2	1450
PKD	15	170	5	1750
PKL	11,4 - 15	200	6	3400
MC	13-20	150 - 200	4,2 - 7,5	1450
MD	15 -19	140 - 200	4,0 - 7,2	1750
ME	15	200	6	2800
ML	13,2 - 19	200	4,9 - 7,2	3400
MKC	13 - 20	240 - 280	6,8 - 9	1450
MKL	15 - 19	240 - 280	9,2 - 11,7	3400

Tabulka 7 - Čerpadla UDOR 2/4

Typ	Max. průtok	Max. tlak	Výkon	Max. otáčky
	[l*min ⁻¹]	[bar]	[kW]	[min ⁻¹]
PWC	8,5 - 13	120	1,9 - 2,9	950 - 1450
MWC 15	10 - 15	200	3,8 - 5,7	950 - 1450
MWC 20	13,1 - 20	200	4,9 - 7,5	950 - 1450
GWC 30	19,7 - 30	200	7,4 - 11,3	950 - 1450
GWC 50	31 - 48	120	7,1 - 10,9	950 - 1450
PSC	11 - 16	150	3,1 - 3,7	1450
MSC	16 - 20	200	6 - 7,5	1450
GSC	27 - 42	150 - 200	10,2 - 12,8	1450

Tabulka 8 - Čerpadla UDOR 3/4

Typ	Max. průtok	Max. tlak	Výkon	Max. otáčky
	[l*min ⁻¹]	[bar]	[kW]	[min ⁻¹]
NX-B	24 - 52	150 - 300	18,4 - 20	1000
NX-C	34 - 75	150 - 300	26,2 - 28,8	1450
NX-C	25	500	24	1450
GAMMA	62 - 240	50 - 60	5,8 - 27,1	600
GAMMA-IL	84 - 202	80 - 100	15,9 - 31,1	600
VX	98 - 155	130 - 200	36,9 - 38	1000
PENTA-B	19 - 49	200 - 500	16,5 - 22,6	1000
PENTA-C	27 - 71	200 - 500	25,4 - 44,6	1450
ED	11 - 38	110 - 280	2,2 - 11	1450
EF	17 - 38	150 - 500	42309	1450

Tabulka 9 - Čerpadla UDOR 4/4

2.5 Vysokotlaká plunžrová čerpadla CAT společnosti Hennlich

Tato firma se zabývá výrobou těsnění, kluzných pouzder, pružin, čerpací techniky, trysek, armatur, rychlospojek a uchopovačů, měřících prvků, pneumatiky, hydrauliky, motorů a filtrační techniky. [7]

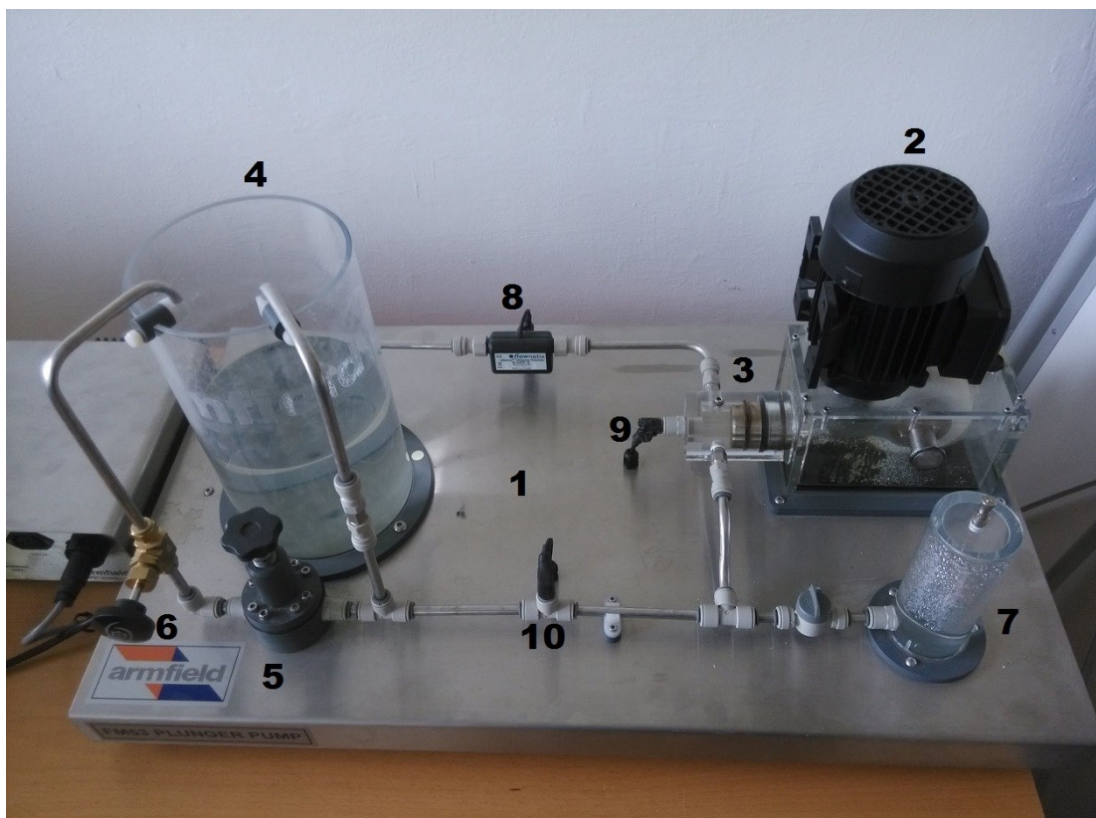
Z triplexních čerpadel jsem vybral pár druhů, pro názorné srovnání s jinými výrobci.

Typ	Max. průtok	Max. tlak	Max. otáčky	Výkon
	[l*min ⁻¹]	[bar]	[min ⁻¹]	[kW]
781 / 781K	17	345	1700	11,5
1851 / 1851K	38	155	958	11,3
1861 / 1861K	38	210	1429	15,4
2831 / 2831K	95	70	1025	12,8
3801 / 3801K	34	345	800	23
3811 / 3811K	53	210	800	21,5
3821 / 3821K	87	140	800	23,6
3831 / 3831K	136	85	800	22,1
3841 / 3841K	170	170	765	23,1
6811 / 6811K	57	345	600	38,4
6821 / 6821K	95	210	615	38,3
6831 / 6831K	151	160	625	47
6841 / 6841K	182	140	615	49,1
6861 / 6861K	227	85	520	36,8

Tabulka 10 - Čerpadla Hennlich

3 POPIS MĚŘÍCIHO ZAŘÍZENÍ ARMFIELD FM53

V této kapitole se budu zabývat popisem demonstračního zařízení Armfield FM53, které se využívá k měření základních charakteristik plunžrového čerpadla. Plunžrové čerpadlo, které tvoří hnací celek celého zařízení, je napojeno na potrubní systém s nádrží. Demonstrační zařízení FM53 tak tvoří uzavřený obvod bez nutnosti napojení na externí zdroj vody či napojení do odpadního systému pro odvod čerpané vody. Firma Armfield dodala k tomuto demonstračnímu zařízení software s označením FM53-304, který je nainstalován na počítači. Komunikaci mezi počítačem a zařízením Armfield zajišťuje zařízení IFD7, které je propojeno s počítačem přes USB port. [13]



Obrázek 13 - Armfield FM53

3.1 Popis demonstračního zařízení:

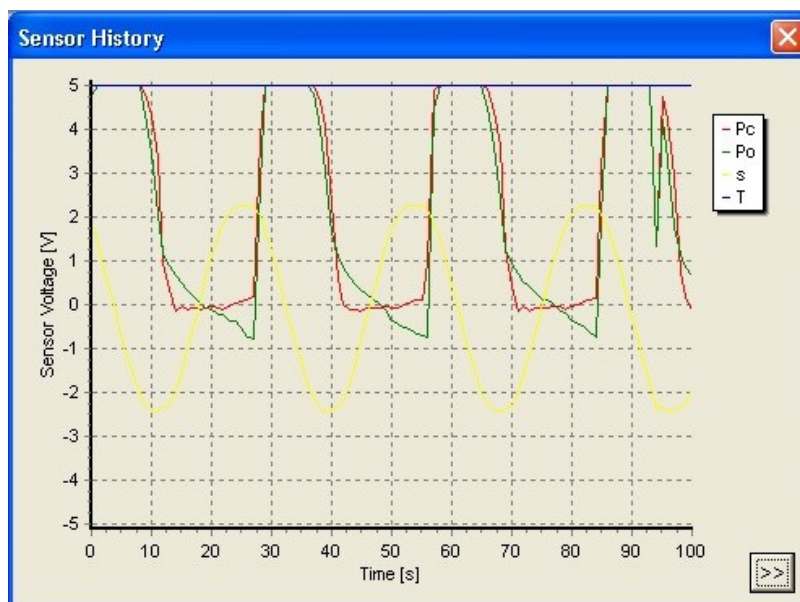
Toto zařízení se skládá z 11 hlavních částí a to:

- 1) **Základna** – hlavní plocha, ke které jsou připojeny všechny části zřízení, je zhotovena z hliníku a stabilitu ji zajišťují čtyři nastavitelné nožky.

- 2) **Elektromotor** – pohání plunžrové čerpadlo umístěné pod ním, je regulovatelný přes PC a má výkon 250 W.
- 3) **Čerpadlo** - malé jedno-plunžrové čerpadlo, které je poháněno elektromotorem, který je upevněn nad boxem, ve kterém je čerpadlo upevněno. Poloměr pístu je $r = 16$ mm a jeho zdvih je $s = 15$ mm.
- 4) **Nádrž na vodu** - průhledná válcovitá nádoba bez vrchního víka, vyrobená z akrylátu. Plní funkci zásoby vody do měřicího obvodu. Ze spodní strany se dá snadno vypustit, z boční strany je připojeno sací potrubí a přívod vody zajišťuje výtlačné potrubí.
- 5) **Zátěžový ventil** - tento ventil slouží k nastavení konstantního tlaku ve výtlačném potrubí, který působí jako zátěž na čerpadlo.
- 6) **Pojistný ventil** - tento ventil slouží k zamezení překročení limitní hodnoty tlaku ve výtlačném potrubí. Hodnoty nastavení pojistného tlaku na tomto ventilu je 5 bar.
- 7) **Vzdušník** - je připojen do výtlačného potrubí prostřednictvím ventilu. Pokud je ventil uzavřen, nedochází k žádnému tlumení a můžeme měřit pulsace tlaku typické pro pracovní cyklus plunžrového čerpadla. Pokud připojíme vzdušník k systému, dojde k částečnému tlumení těchto pulsací. Přes ventilek v horní části vzdušníku lze měnit vnitřní tlak ve vzdušniku a tím ovlivnit míru tlumení v systému.
- 8) **Průtokoměr** - je připojen do výtlačného potrubí prostřednictvím ventilu. Pokud je ventil uzavřen, nedochází k žádnému tlumení a můžeme měřit pulsace tlaku typické pro pracovní cyklus plunžrového čerpadla. Pokud připojíme vzdušník k systému, dojde k částečnému tlumení těchto pulsací. Přes ventilek v horní části vzdušníku lze měnit vnitřní tlak ve vzdušniku a tím ovlivnit míru tlumení v systému.
- 9) **Snímač tlaku ve válci čerpadla** - měří hodnoty tlaku přímo ve válci plunžrového čerpadla. Tento ventil slouží k nastavení konstantního tlaku ve výtlačném potrubí, který působí jako zátěž na čerpadlo.
- 10) **Snímač tlaku ve výstupním potrubí** - měří hodnoty tlaku ve výstupním potrubí, který je generován čerpadlem.
- 11) **Vypouštěcí ventil** – pomocí něj lze snadno vypustit obsah vody z celého systému.

4 PROBLÉMY SE ZAŘÍZENÍM FM53 PLUNGER PUMP

Při měření jsem se setkal s chybami, které jsou dle mého názoru zapříčiněny špatným softwarem. Kontroloval jsem nastavení, funkčnost a výstupní hodnoty snímačů. Všechny fungují dobře a zobrazují data v přednastaveném časovém intervalu.



Obrázek 14 - Výstupní hodnoty snímačů tlaku, teploty a polohy plunžru

Zjistil jsem, že „Exercise A“ a „Exercise B“ (dále jen cvičení A; B; C) nefungují tak, jak by měly. Ve variantě A ani B nelze nastavit vzorkovací frekvenci na nižší ani vyšší hodnotu než je 1 sekunda. Při stisku ikony (GO) dojde ke snímání 2002 hodnot, které jsou naprosto stejné a ve většině případů se ve výsledných hodnotách zobrazují pouze maximální rozsahy měřidel. Samotné snímání trvá asi 2 sekundy, ale z hodnot nelze nic užitečného vyčíst. Pouze ve cvičení C lze nastavit vzorkovací frekvenci na hodnoty od 50 ms (což výrazně zpomaluje chod počítače), doporučuji nastavit na 100 ms (angl. [msec]), výsledky jsou i tak dost přesné. Uživatel se dostane do tohoto nastavení pomocí záložky „Sample“ a dále poslední z možností „Configure...“ Otevře se okno s názvem „Sample Configuration“ a musíme nastavit automatickou vzorkovací operaci s intervalem 100 [msec] a trvání vzorku (angl. Duration of Sampling) na „Continuous“ čili nepřetržitou délku trvání až do zastavení uživatelem. V případě, že navolím trvání ve fixně daném čase, opět začne program dělat problémy a hodnoty neodpovídají ničemu zadanému (Odzkoušeno – nastavení trvání délky měření na 10s vytvořilo 7 nesprávných vzorků, které byly vytvořeny za delší dobu než 10s a určitě nebyly zaznamenány po sekundách ani po

desetinách sekund). Při nastavení na nepřetržitou délku snímání už program zapisuje hodnoty po sekundách či milisekundách a je snadné ho po určitém časovém intervalu zastavit.

Dále je zde problém, že software automaticky nepočítá objemovou účinnost, při každém zapsání hodnot se musí provádět reset maximálních tlaků (výstupního a na válci) a k tomu provést nový přepočet pro objemovou účinnost (označena E_v). Pokud se přepočet neudělá při každé změně otáček, vychází poté objemová účinnost i více než 100%.

Motor Speed [%]	Pump Speed n [spm]	Volumetric Efficiency E_v [%]
100	63	90,1
90	56	90,3
80	50	91,2
70	44	91,3
60	38	91,8
50	31	92,6
40	25	94,5
30	19	93,2
20	13	100,8

Obrázek 15 - Chyba při výpočtu objemové účinnosti

Program také nedokáže vykreslit P-V diagram, namísto toho vždy vykreslí pár bodů, které se opět rovnají maximálnímu rozsahu měřidel.

5 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK PLUNŽROVÉHO ČERPADLA NA ZAŘÍZENÍ ARMFIELD FM53

5.1 Důležité informace před měřením

Před každým měřením je důležité zkontrolovat vypouštěcí ventil, který najdeme pod nádrží. Musí být dobře utáhnut, aby nedocházelo k únikům vody z nádrže. Dále je nutné zkontrolovat hladinu vody v nádrži, za předpokladu, že je nádrž již vodou naplněna. Měla být 20 cm pod horním okrajem nádrže. Ze zařízení vede kabel do IFD7 a z něj napájecí kabel do zásuvky a USB kabel do počítače. IFD7 je typ rozhraní, které digitalizuje hrubé data a přenáší je pomocí USB výstupu do PC. V PC je nainstalován software s označením „FM53 Plunger Pump“ následně se volí „Exercise A“ popřípadě B-C. Jak jsem zmínil výše (v problémech se zařízením), varianty A a B nefungují korektně, proto zvolím pouze cvičení C. V neposlední řadě je důležité zkontrolovat v pravém dolním rohu, zda software hlásí IFD:OK. [13]

5.2 Měření výstupních tlaků za různých otáček elektromotoru

Cílem tohoto měření bylo získat charakteristiku plunžrového čerpadla pro daný rozsah rychlostí a výstupních tlaků.

5.2.1 Teorie

Za předpokladu, že bychom prováděli měření polohy pístu, tlaku ve válci a tlaku ve výtlačném potrubí v jednom okamžiku, bylo by možné vypočítat vztah mezi těmito parametry. Průběh těchto hodnot by měl sinusový průběh. Při zkrácení tlaků a výtlačného množství kapaliny do jednoho grafu můžeme vypočítat, že jsou jednotlivé parametry ve fázi (tlak ve válci a výtlačné množství), případně jsou parametry fázově posunuté (maximální tlak ve výtlačném potrubí je zpožděn oproti tlaku ve válci). Pulzace lze do určité míry vyhladit za pomoci vzdušníku na vstupu a výstupu plunžrového čerpadla. Zařízení Armfield FM53 má vzdušník na výstupu z čerpadla. Lze ho připojit či odpojit ze systému a měřit tak vliv na průběh charakteristiky čerpadla. Při vytlačení kapaliny pístem, dojde k nárůstu tlaku a průtok se rozdělí mezi vzdušník a výtlačné potrubí. Ve vzdušníku

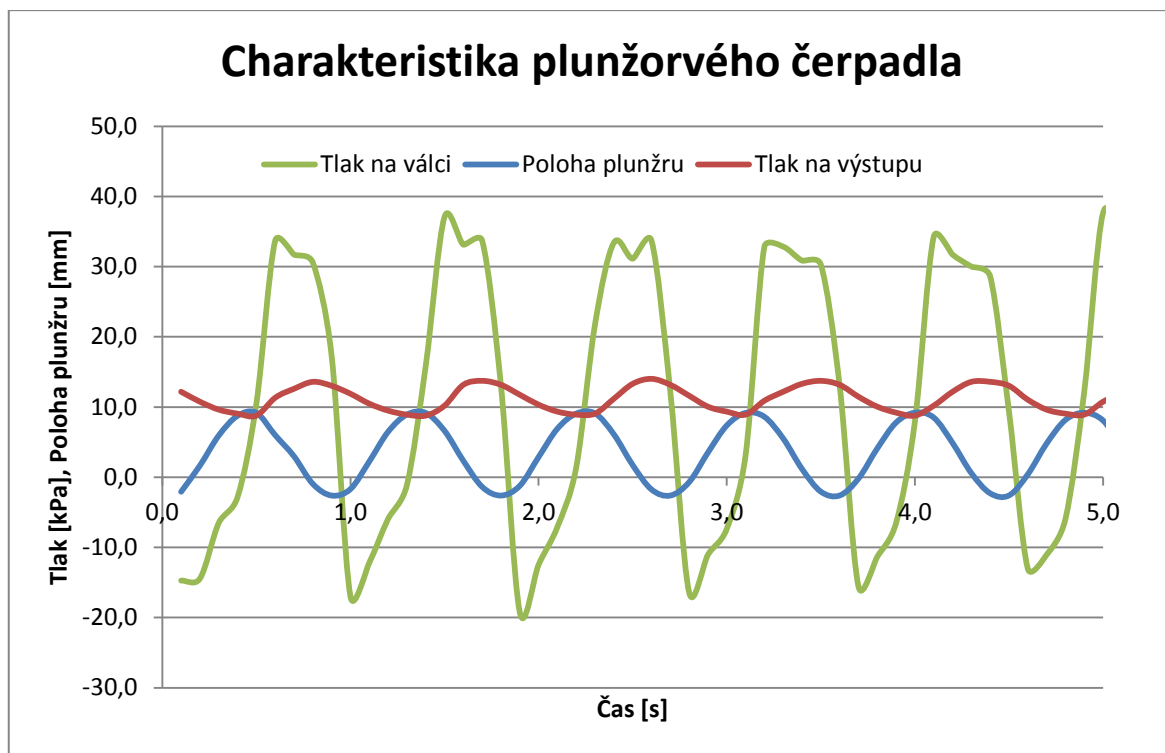
dochází ke stlačení vzduchu kapalinou. Jakmile začne píst sát, dojde k poklesu tlaku až do doby, kdy se tlak v potrubí a ve vzdušníku vyrovnají. V tuto chvíli s dalším poklesem tlaku dochází k vyprázdnění vzdušníku a tím i dodávce kapaliny do výstupního potrubí. Opět do doby než se tlaky vyrovnají. Lze tedy vypořizovat, že vzdušník má vliv na částečné vyhlazení dodávaného průtoku. [13]

5.2.2 Postup měření

- Provedl jsem zapojení zařízení, spustil software FM53 Plunger pump a zvolil „Exercise C“
- Nastavil jsem správně snímání po 0,1 sekundách
- Otevřel jsem zátěžový ventil, aby byl tlak na výtlačném potrubí na nejnižší hodnotě (avšak nikdy není nulový)
- Zapnul jsem čerpadlo a nastavil otáčky na 100%, pomocí ikony na zaznamenávání dat (najdeme ji na panelu nástrojů) jsem zapsal data do tabulky.
- Nastavil jsem maximální tlak ve výtlačném potrubí na přibližnou hodnotu 100 kPa, čerpadlo jsem nechal běžet na 100 % otáčkách a provedl jsem pomocí tlačítka „Reset“ vynulování hodnot tlaků, aby byly výsledky přesné.
- Měření jsem zopakoval pro hodnoty 200, 300 a 400 kPa. Jak jsem již zmínil, tyto hodnoty nám udávají maximální (nikoliv aktuální tlak) ve výtlačném potrubí. Maximální tlak na válci byl vždy o 20 až 30 kPa menší.
- Následně jsem snížil otáčky elektromotoru na 50 % a podle stejného postupu provedl měření pro všechny zvolené tlaky na výstupním potrubí.
- Výsledky jsem převedl pomocí software do Excelu.

5.2.3 Výsledky prvního měření

Jednotlivé fáze charakteristiky mají sinusový průběh. Průběh tlaků je fázově posunut oproti poloze pístu. Tlak na válci dosáhne maxima dříve než tlak na výstupu. Hodnota tlaku na výstupu se pohybuje v rozmezí jednotek, má hladký průběh, kdežto tlak na válci kolísá od záporných hodnot ke kladným, viz graf č. 1. Z vypočtených hodnot vyplývá, že charakteristika tlaku na válci je fázově posunutá o 0,1 sekundy vůči poloze plunžru, kdežto charakteristika tlaku na výstupu je posunuta o 0,45 sekundy.



Graf č. 1 - Charakteristika plunžrového čerpadla Armfield FM53

Výsledky pro netlumený a tlumený obvod jsou uvedeny v přílohách na straně I až IV a je z nich patrné, že vzdušník plní funkci vyrovnávače tlaku. Díky němu nedochází k velkým tlakovým výkyvům jako při jeho odstavení (zavření). Při nulové zátěži v obvodu se výkyvy příliš neprojeví, avšak už při zátěži 100 kPa jsou dané charakteristiky velmi odlišné. Bez použití vzdušníku se hodnoty tlaku na výstupu (tlak ve výtláčném potrubí) pohybují v rozmezí 66 kPa, kdežto při zapojení vzdušníku do obvodu (uvažujeme cca 50% naplnění vzduchem a maximální otáčky motoru) hodnoty kolísají v rozmezí pouhých 18 kPa. Jak lze vidět, došlo ke snížení na méně než třetinu. Tlak na válci si zachovává stejný průběh a lze říci, že vzdušník na něj nemá vliv. Z grafů sice vyplývá, že maximální hodnoty tlaků jsou pro otevřený nebo uzavřený vzdušník rozdílné, ale je nutné brát v úvahu, že byla zvolena rozdílná počáteční zátěž. Samotné otevření vzdušníku způsobí změnu tlaku v potrubí v řádech jednotek, až desítek kPa. Důležitý je pouze rozdíl maximálních a minimálních hodnot označený jako Δp . Měření jsem prováděl jak pro maximální otáčky elektromotoru (tj. 63 zdvihů pístu za minutu), tak i pro poloviční otáčky motoru. Grafy pro zátěže 200, 300 a 400 kPa jsem neuváděl, mají podobný průběh jako při zátěži 100 kPa. Tlaky se pohybují do velikosti aktuálně zvolené zátěže. Tlak na válci (označený jako p_c) se mění přibližně od -21 kPa až do výše nastavené zátěže, tlak na

výstupu (označený p_o) má plynulejší charakteristiku. Výsledky měření pro tlak ve výtlačném potrubí s ohledem na použití vzdušníku jsou uvedeny v tabulce č. 11.

Zátěž	100% otáčky		50% otáčky	
	otevřený	zavřený	otevřený	zavřený
[kPa]	Δp_o	Δp_z	Δp_o	Δp_z
0	5	19	4	4
100	21	63	15	56
200	17	58	17	47
300	31	73	31	59
400	34	84	33	71

Tabulka 11 - Porovnání tlaků v závislosti na otáčkách a otevření/ zavření vzdušníku

5.3 Měření P-V charakteristiky

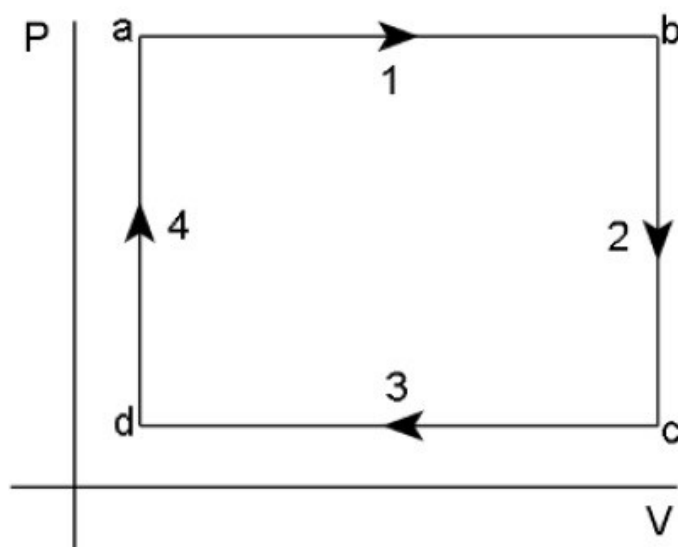
Cílem tohoto měření bylo naměřit hodnoty nutné k sestrojení P-V diagramu pro plunžrové čerpadlo.

5.3.1 Teorie

Abych stanovil práci vykonanou čerpadlem, je nutné popsat jednotlivé fáze pracovního cyklu.

- 1) Píst se pohybuje zpět, dochází k nasávání kapaliny do prostoru válce ze sacího potrubí.
- 2) Jakmile píst dosáhne své úvratě, nedochází k dalšímu nárůstu objemu ve válci. Tlaky ve válci a v sacím potrubí se vyrovnají.
- 3) Píst se začíná pohybovat zpět, dochází k vytlačování kapaliny z prostoru válce skrze ventil do výtlačného potrubí.
- 4) Píst se nachází v úvrati, nedochází k dalšímu vytlačování kapaliny. Tlaky ve výstupním potrubí a válcem se vyrovnají.

Celý cyklus můžu zakreslit do grafu, kde vyhodnotím závislost tlaku ve válci k dodanému objemu kapaliny. [15]



Obrázek 16 - P-V diagram plunžrového čerpadla [15]

Práci odevzdanou čerpadlem kapalině můžeme stanovit z plochy, kterou vymezuje vytvořený graf.

$$\oint dA = \int_a^b p \, dV + \int_b^c p \, dV + \int_c^d p \, dV + \int_d^a p \, dV = \oint p \, dV$$

Jelikož dopravovanou kapalinou je voda, uvažují, že při použití v tomto zařízení má vlastnost nestlačitelné kapaliny. Lze tedy obecně říct, že objem kapaliny, jenž vstupuje do válce, je roven objemu, který z válce vystupuje (při vyšší hodnotě tlaku). [13]

5.3.2 Postup měření

Pracovní postup byl stejný jako při prvním měření, avšak software nevykresluje P-V diagram. Zobrazí pouze pár bodů, které ukazují špatné hodnoty.

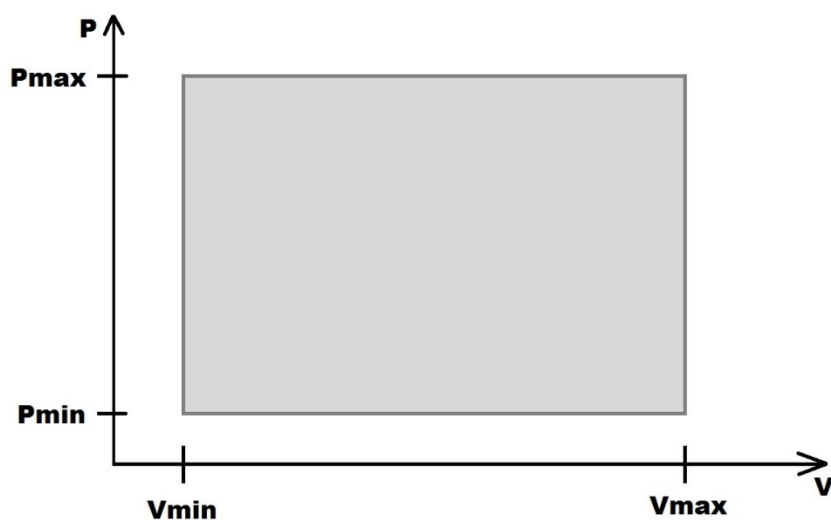
Z naměřených hodnot jsem ručně sestrojil P-V diagram.

5.3.3 Výsledky druhého měření

Z výsledných hodnot jsem sestrojil tabulku č. 12, která vypovídá o tom, že se pouze zvyšuje maximální tlak (za pomoci zátěžového ventilu), minimální tlak se pohybuje stále okolo hodnoty -21 kPa a tím dochází k nárůstu vykonané práce. Pro názornější představu je přiřazen schematický obrázek pod tabulkou.

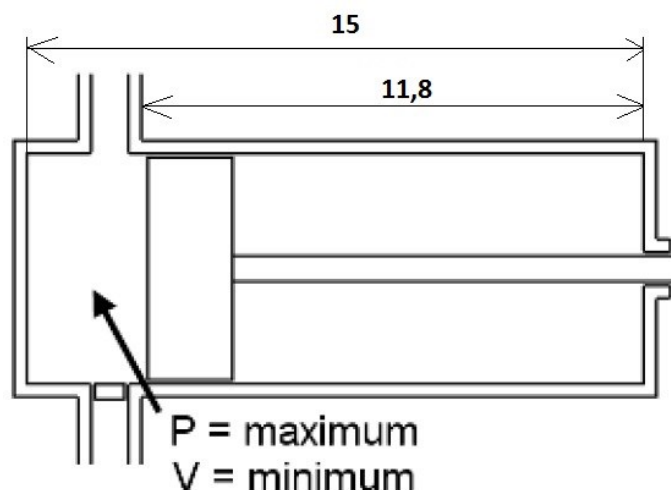
Zátěž	p_{\max}	p_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	A
[kPa]	[kPa]	[kPa]	[cm ³]	[cm ³]	[J]
57,8	56,9	-21,0	12,064	2,574	0,739
156,0	156,3	-20,7	12,064	2,574	1,680
241,0	241,6	-21,8	12,064	2,574	2,499
340,4	340,7	-22,9	12,064	2,574	3,451
432,7	435,6	-22,7	12,064	2,574	4,349

Tabulka 12 - Sestavování p-V diagramu



Obrázek 17 – Schéma p-V diagramu

Vycházel jsem z předpokladu, že se plunžr pohybuje v rozmezí 15 mm. Při sání vypisuje maximální hodnotu 9,2 mm a koncová poloha při výtlaku je -2,6 mm (kladné a záporné hodnoty nejsou symetrické podle nuly). Při součtu absolutních hodnot dostaneme číslo 11,8 mm, které nám udává celkovou dráhu, po které se plunžr pohybuje. Avšak senzor, který snímá pohyb plunžru, je kalibrován na rozsah -4 až 11 mm. Z toho lze získat předpoklad, že zbývající část válce má délku 3,2 mm, viz obrázek č. 18. Objem kapaliny, která vyplňuje konec válce, se snadno vypočte vynásobením této zbývající délky a čelní plochy plunžru. Stejným způsobem vypočteme i hodnotu maximálního objemu, pouze zaměníme délky. Ve výsledku lze snadno sestavit p-V diagram a získat tak teoretickou hodnotu vykonané práce. Výpočty byly prováděny v tabulkovém editoru, vzorce použité pro výpočet jsou uvedeny v kapitole 1.13 a následující kapitole 5.4.



Obrázek 18 - Rozměry válce [15]

5.4 Výpočet objemové účinnosti

Cílem tohoto měření bylo zjistit objemovou účinnost za různých hodnot otáček a při různých maximálních tlacích ve výtlačném potrubí.

5.4.1 Teorie

K výpočtu objemové účinnosti plunžrového čerpadla je nutno znát skutečné dopravované množství kapaliny za jeden zdvih k objemu, který vytlačí píst z válce za jeden zdvih bez uvažování ztrát. [13]

$$\eta_0 = \frac{V_s}{V_t} \cdot 100\%$$

Teoretický objem se vypočítá pomocí délky dráhy pístu a jeho plochy:

$$V_t = S_p \cdot (s_{max} - s_{min})$$

Kde: S_p - plocha pístu

s - zdvih pístu

Pro Armfield FM53 je rozdíl těchto hodnot ($s_{\max} - s_{\min}$) = 15 mm

r - poloměr pístu a je roven 16 mm

5.4.2 Postup měření

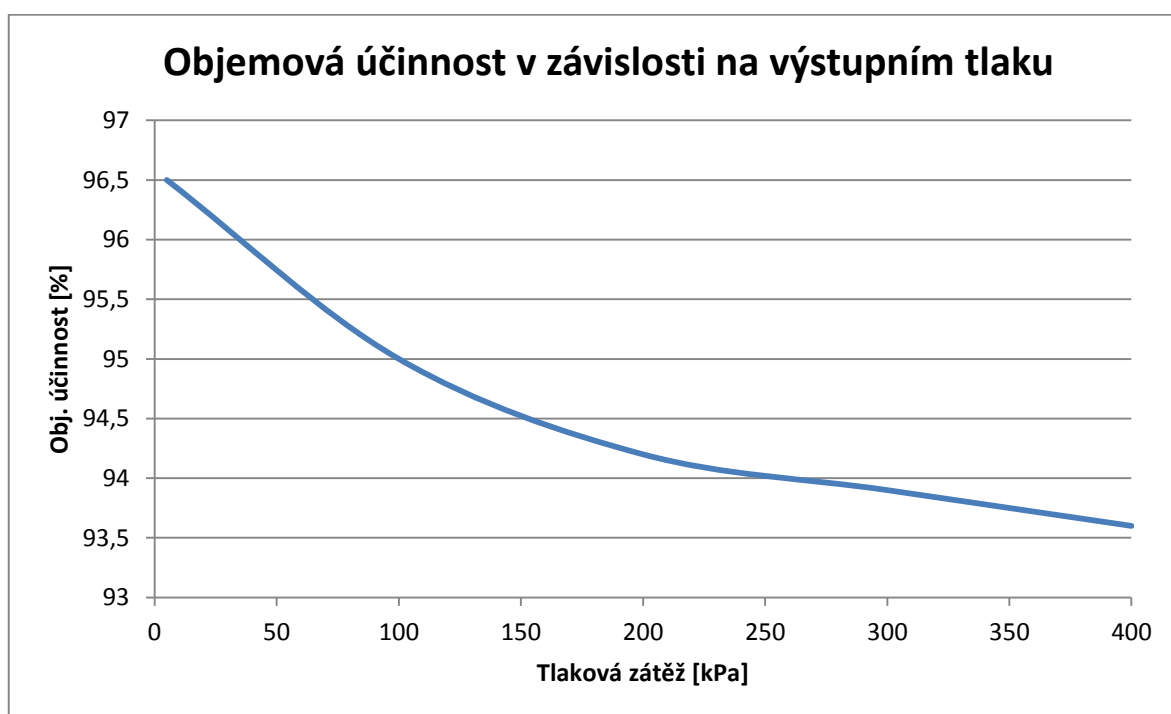
- Spustil jsem zařízení, zapojil USB konektor do PC, spustil software FM53 Plunger pump a zvolil „Exercise C“
- Přenastavil jsem zapisování hodnot na automatické a senzory jsem nastavil na snímání každých 100 milisekund.
- Otevřel jsem zátěžový ventil, aby byl tlak na výtlačném potrubí na nejnižší hodnotě.
- Zapnul jsem čerpadlo a nastavil otáčky na 100%, provedl přepočet objemové účinnosti pomocí tlačítka v levém dolním rohu a pomocí ikony na zaznamenávání dat (najdeme ji na panelu nástrojů) jsem zapsal data do tabulky.
- Otáčky jsem postupně snižoval o 10% z maxima až na hodnotu 30%.
- Po každém snížení otáček bylo třeba provést „Reset“ obou maximálních tlaků, tj. tlak na výstupu a na válci.
- Dále bylo nutno, při každém snížení otáček, udělat nový přepočet objemové účinnosti, jinak zařízení ukazovalo hodnoty větší než 100 %.
- Nastavil jsem maximální tlak ve výtlačném potrubí na přibližnou hodnotu 100 kPa, výkon čerpadla jsem vrátil zpět na 100 %, provedl jsem pomocí tlačítka „Reset“ vynulování hodnot obou tlaků a nechal přepočíst objemovou účinnost, aby byly výsledky co nejpresnější.
- Měření jsem zopakoval pro hodnoty 200, 300 a 400 kPa.
- Výsledky jsem převedl pomocí software do Excelu.

5.4.3 Výsledek třetího měření

Objemová účinnost zařízení FM53 se proměnlivě mění s otáčkami elektromotoru. Proměření objemové účinnosti jsem prováděl dvakrát, za stejných podmínek, v obou případech vyšly jiné hodnoty. Měření bylo bez zátěže v potrubí, čili tlakové ventily byly

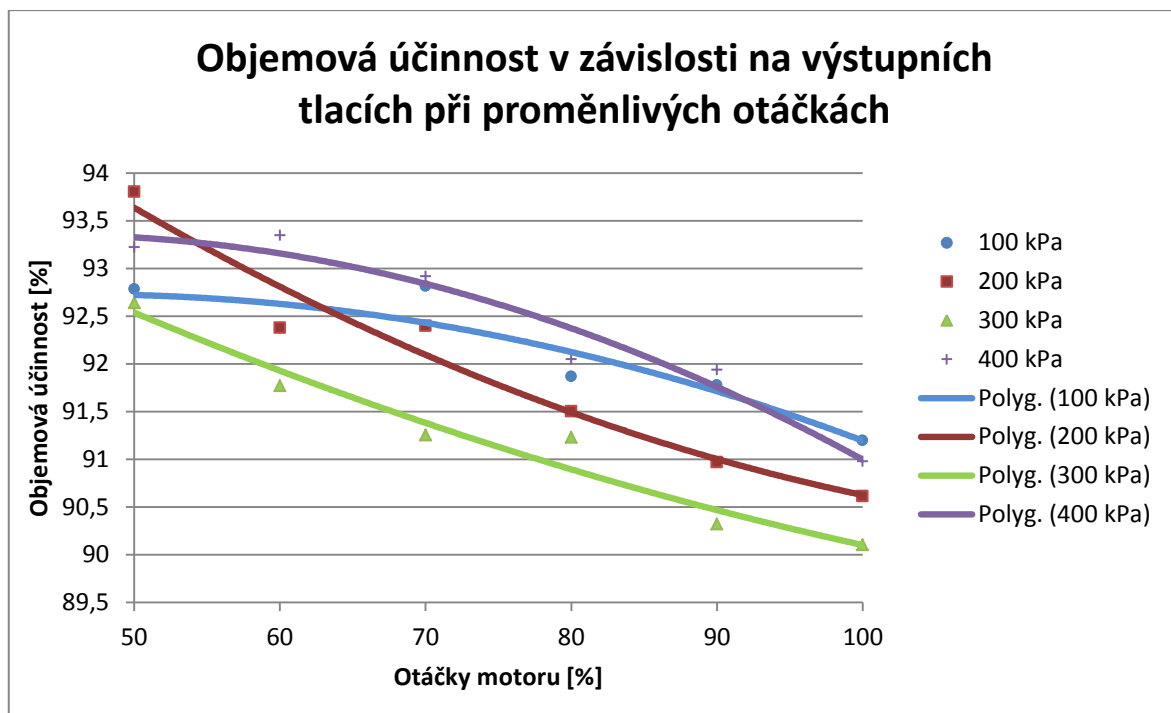
otevřeny. Při prvním měření docházelo k nárůstu objemové účinnosti, avšak v druhém měření naopak k poklesu. Obecně lze říci, že se objemová účinnost plunžrového čerpadla pohybuje v rozmezí 90 až 97 %.

Naopak při měření objemové účinnosti za různých výstupních tlaků měla křivka (graf č. 2) klesající průběh. Při otevřených ventilech, kdy byl tlak na výstupu na nejnižší hodnotě, byla účinnost téměř 97% (při maximálním výkonu motoru). Při uzavírání zátěžového ventilu docházelo k pozvolnému poklesu až k hodnotě 93,5 % při 400 kPa.



Graf č. 2 - Přehled objemové účinnosti s měnící se tlakovou zátěží

Z posledního propočtu objemové účinnosti plunžrového čerpadla (graf č. 3) lze vyvodit, že se účinnost zvyšuje se snižujícími se otáčkami. Měření bylo prováděno za různých otáček motoru, od 100 % (100 % je přibližně 63 zdvihů plunžru za minutu) až po 50 % (tj. 31 zdvihů za minutu) při zátěžích 100, 200, 300 a 400 kPa. Při deseti a dvaceti procentní rychlosti elektromotoru program ukazoval špatné hodnoty, naměřil jsem účinnost i více než 100 %. Předpokládám, že je to opět chyba software. Z výsledku je patrné, že se objemová účinnost pohybuje v rozmezí 90 až 94 %. Jednotlivé křivky mají podobné průběhy, maxima dosahují při 50 % rychlosti motoru a minima při maximální rychlosti.



Graf č. 3 - Objemová účinnost v závislosti na výstupních tlacích

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo ověření funkce demonstračního zařízení Armfield FM53, provést návrh postupu pro vyhodnocení parametrů plunžrového čerpadla, a to za různých podmínek.

V úvodu mé práce jsem se zabýval popisem a základním rozdělením čerpadel. Je zde popsáno k jakým účelům se čerpadla používají, na jakém principu fungují a ve kterém odvětví průmyslu se s nimi můžeme setkat. Uvedl jsem rozdíly mezi čerpadly hydrostatickými a hydrodynamickými a také zmínil čerpadla pracující na jiném principu přeměny energie. Detailněji jsem se zaměřil na čerpadla s klikovým mechanismem, a to na čerpadla plunžrová a pístová, která jsou si velmi podobná. Popsal jsem hlavní části pístových čerpadel, jakou funkci v zařízení plní a přidal názorné obrázky. Na konci první kapitoly je uvedena problematika použití víceválcových čerpadel. Jak se změní charakteristika průtoku při použití dvou a více pístového čerpadla namísto jednopístového, jak se volí fázový posun každého z pístu, aby byla průtoková charakteristika nejplynulejší.

Druhá kapitola je věnována výrobcům plunžrových čerpadel, které mají působnost na našem území. Na českém trhu se objevuje velké množství podniků či společností, které prodávají velkou škálu čerpadel, avšak nejsou současně jejich výrobci. Proto jsem vybral pouze pět výrobců, kteří se zabývají výrobou plunžrových čerpadel, a detailněji jsem se na ně zaměřil. Byly to následující firmy: Sigmet Olomouc, Sigma pumpy Hranice, AxFlow, UDOR a Hennlich. U každého prodejce jsem zmínil, do jakého odvětví průmyslu dodává své výrobky a jakými typy plunžrových čerpadel disponuje. Do zkrácených tabulek jsem zapsal maximální tlaky, průtoky, výkony a teploty, do kterých pracují dané typy čerpadel. V některých katalogích bohužel nebyly uvedeny všechny tyto hodnoty, protože na vzhled a náplň katalogů neplatí jednotná norma. Z výše uvedených společností měly nejpodrobnější katalogy firmy UDOR a Sigmet.

Ve třetí kapitole jsem se zabýval popisem demonstračního zařízení Armfield FM53. Popsal jsem, z jakých komponent se celé zařízení skládá a jakou funkci v sestavě zastávají. Čtvrtá kapitola je s tím úzce spojena. Sepsal jsem vypočítané chyby, které během měření nastaly. Z počátku jsem se domníval, že chyba bude na straně snímačů, což se nakonec ukázalo jako chybný předpoklad. Vina byla čistě na straně programu od společnosti Armfield.

Poslední pátá kapitola byla věnována samotnému měření na demonstračním zařízení Armfield FM53. Měřil jsem výstupní tlaky za různých otáček elektromotoru, počítal práci odevzdanou čerpadlem kapalině a prováděl přepočet objemové účinnosti při různých otáčkách motoru a maximálních tlacích ve výtlačném potrubí. Cílem prvního měření bylo zjistit, jaké jsou základní charakteristiky plunžrového čerpadla. Z naměřených hodnot jsem vykreslil průběhy tlaků současně s polohou plunžru v závislosti na čase. Měření jsem opakoval pro různě nastavené zátěže a zároveň jsem zjišťoval vliv použití vzdušníku na výstupní tlaky. Výsledky jsem zaznamenal do tabulky. Druhé měření, zabývající se výpočtem práce odevzdané čerpadlem, jsem řešil teoreticky. Z naměřených hodnot nebylo možné pomocí programu sestavit P-V diagram, proto jsem uvedl teoretický předpoklad, jakých hodnot by měla tato práce dosahovat. V posledním třetím měření jsem se zabýval zjištěním objemové účinnosti plunžrového čerpadla. Měření probíhalo za stejných podmínek, vícekrát za sebou, výsledky byly rozdílné. Rozptyl hodnot byl v rozmezí 7%. Z měření vyplývá, že účinnost klesá s rostoucími otáčkami. Kvalitnějších výsledků by se dalo dosáhnout s novým programem od společnosti Armfield. Doporučuji navázat kontakt s výrobcem a požádat jej o novější verzi, kde by měly být opravené chyby, které znesnadňují či dokonce neumožňují některá měření.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Typy plunžrových čerpadel: dvojčinné, jednočinné diferenciální	14
a dvojčinné diferenciální [1]	14
Obrázek 2 - Jednočinné pístové čerpadlo [16]	16
Obrázek 3 - Dvojčinné pístové čerpadlo [16]	17
Obrázek 4 - Diferenciální čerpadlo [16]	18
Obrázek 5 - Schéma zdvižného čerpadla [16]	19
Obrázek 6 - Charakteristika jednopístového čerpadla [14]	20
Obrázek 7 - Charakteristika dvoupístového čerpadla [14]	20
Obrázek 8 - Charakteristika třípístového čerpadla [14]	21
Obrázek 9 – P-V diagram čerpadla [13]	23
Obrázek 10 - Závislost průtoku na otáčkách a tlaku [14]	24
Obrázek 11 - Závislost teoretického výkonu na otáčkách a tlaku [14]	24
Obrázek 12 - Závislost momentu na otáčkách a tlaku [14]	25
Obrázek 13 - Armfield FM53	33
Obrázek 14 - Výstupní hodnoty snímačů tlaku, teploty a polohy plunžru	35
Obrázek 15 - Chyba při výpočtu objemové účinnosti	36
Obrázek 16 - P-V diagram plunžrového čerpadla [15]	41
Obrázek 17 – Schéma p-V diagramu	42
Obrázek 18 - Rozměry válce [15]	43

SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

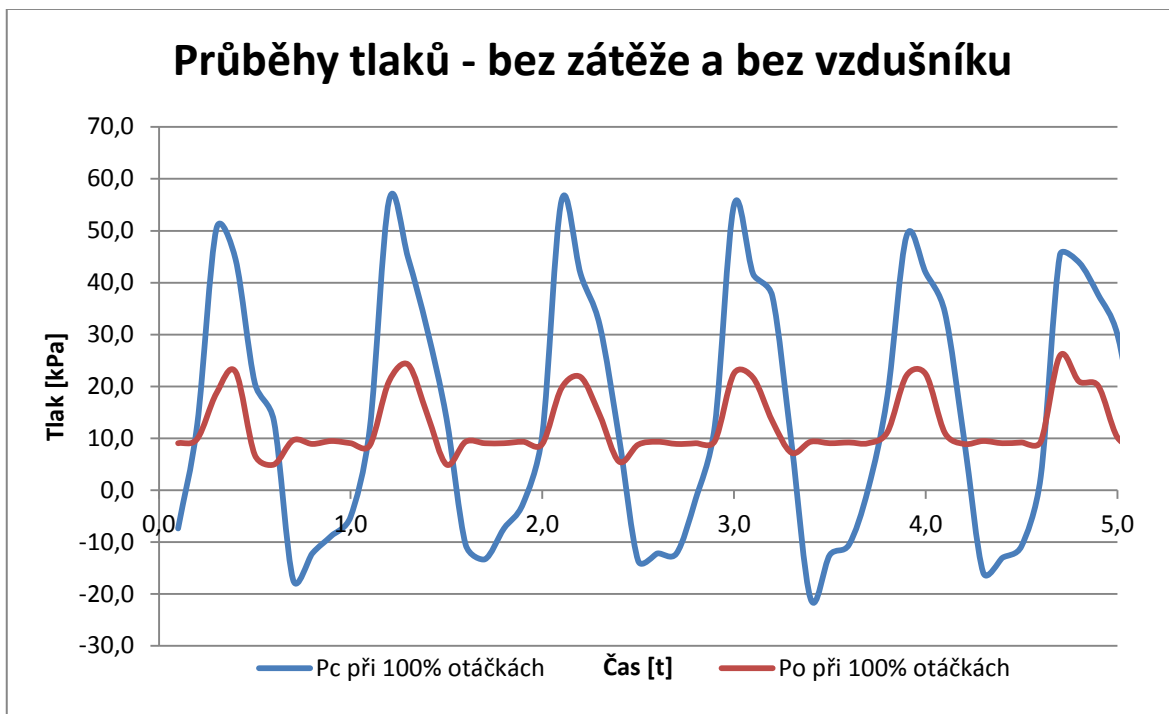
Tabulka 1 - Čerpadla Sigmet Olomouc 1/3.....	27
Tabulka 2 - Čerpadla Sigmet Olomouc 2/3.....	27
Tabulka 3 – Čerpadla Sigmet Olomouc 3/3.....	27
Tabulka 4 - Čerpadla Sigma Hranice.....	28
Tabulka 5 - Čerpadla AxFlow.....	29
Tabulka 6 - Čerpadla UDOR 1/4	30
Tabulka 7 - Čerpadla UDOR 2/4	31
Tabulka 8 - Čerpadla UDOR 3/4	31
Tabulka 9 - Čerpadla UDOR 4/4	31
Tabulka 10 - Čerpadla Hennlich	32
Graf č. 1 - Charakteristika plunžrového čerpadla Armfield FM53	39
Tabulka 11 - Porovnání tlaků v závislosti na otáčkách a otevření/ zavření vzdušníku.....	40
Tabulka 12 - Sestavování p-V diagramu.....	42
Graf č. 2 - Přehled objemové účinnosti s měnící se tlakovou zátěží.....	45
Graf č. 3 - Objemová účinnost v závislosti na výstupních tlacích	46
Graf č. 4 – Průběhy tlaků při nulové zátěži v potrubí, bez použití vzdušníku, při 100% ot. motoru.. I	
Graf č. 5 – Průběhy tlaků při nulové zátěži v potrubí za použití vzdušníku, při 100% ot. motoru..... I	
Graf č. 6 – Průběhy tlaků bez zátěže v potrubí, bez použití vzdušníku, při 50% otáčkách motoru ...II	
Graf č. 7 – Průběhy tlaků bez zátěže v potrubí, za použití vzdušníku, při 50% otáčkách motoruII	
Graf č. 8 – Průběhy tlaků při zátěži 100 kPa, bez použití vzdušníku.....	III
Graf č. 9 – Průběhy tlaků při zátěži 100 kPa za použití vzdušníku.....	III
Graf č. 10 – Průběhy tlaků při zátěži 100 kPa, bez použití vzdušníku, 50% ot. motoru.....	IV
Graf č. 11 – Průběhy tlaků při zátěži 100 kPa za použití vzdušníku, 50% ot. motoru.....	IV

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY / ZDROJE

- [1] Wikipedie: Otevřená encyklopedie. *Plunger pump* [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Plunger_pump
- [2] Plunžrové čerpadlo. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/jineturbiny/plunzrove-cerpadlo.htm>
- [3] Plunžrová čerpadla. *Sigmat Olomouc* [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: <http://www.sigmat.cz/sortiment/prumyslova-cerpadla/cerpadla-hydrostaticka/plunzrova>
- [4] Plunger pump types. *Appropedia* [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: http://www.cd3wd.com/cd3wd_40/ap/File_Plunger_pump_types.html
- [5] Čerpadla. *AxFlow* [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: <http://www.axflow.com/cz/site/produkty/kategorie/cerpadla/>
- [6] Průmyslová čerpadla. *Sigma pumpy hranice, s.r.o.* [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: <http://www.sigmapumpy.com/prumyslova-cerpadla.html>
- [7] Čerpací technika. *HENNLICH* [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: www.hennlich.cz/produkty/cerpaci-technika-86.html
- [8] Vysokotlaká plunžrová čerpadla UDOR. *Tomoz* [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: http://www.tomoz.cz/cs/cerpadla/udor/plunzrova_cerpadla/
- [9] BLEJCHAŘ, T., DRÁBKOVÁ, S.: *Čerpací technika a potrubí, návody do cvičení*. VŠB-TUO, Ostrava, 2010. 76 s. ISBN 978-80-248-2205-1
- [10] BOLDIŠ, P. *Bibliografické citace podle dokumentů ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2, část 2 – Modely a příklady citací u jednotlivých typů dokumentů*. [online]. Datum poslední revize 11. 11. 2004. Dostupné z <http://www.boldis.cz/citace/citace2.pdf>
- [11] BRADA, K., BLÁHA, J.: *Hydraulické stroje*. 1. vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1992. 752s. ISBN 80-03 006655-1
- [12] Princip práce pístových strojů. *Pístová čerpadla* [online]. [cit. 2014-03-24]. Dostupné z: http://ole.wz.cz/honza/5-Pistove_cerpadla.htm
- [13] ZAVADIL, Lukáš. *Týmová cvičení z čerpací techniky*. Skripta FS VŠB – TU Ostrava, 2011. 128 s.
- [14] Mechanika tekutin: *Čerpadlo v potrubním systému*. [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://vyuka.fs.vsb.cz/course/view.php?id=65>
- [15] *Plunger Pump FM53 – Instruction manual*. Armfield Inc., 2010. 56 s.

[16] Objemová čerpadla. [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z:
http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-str-08.02_cerpadlaobjemova.pdf

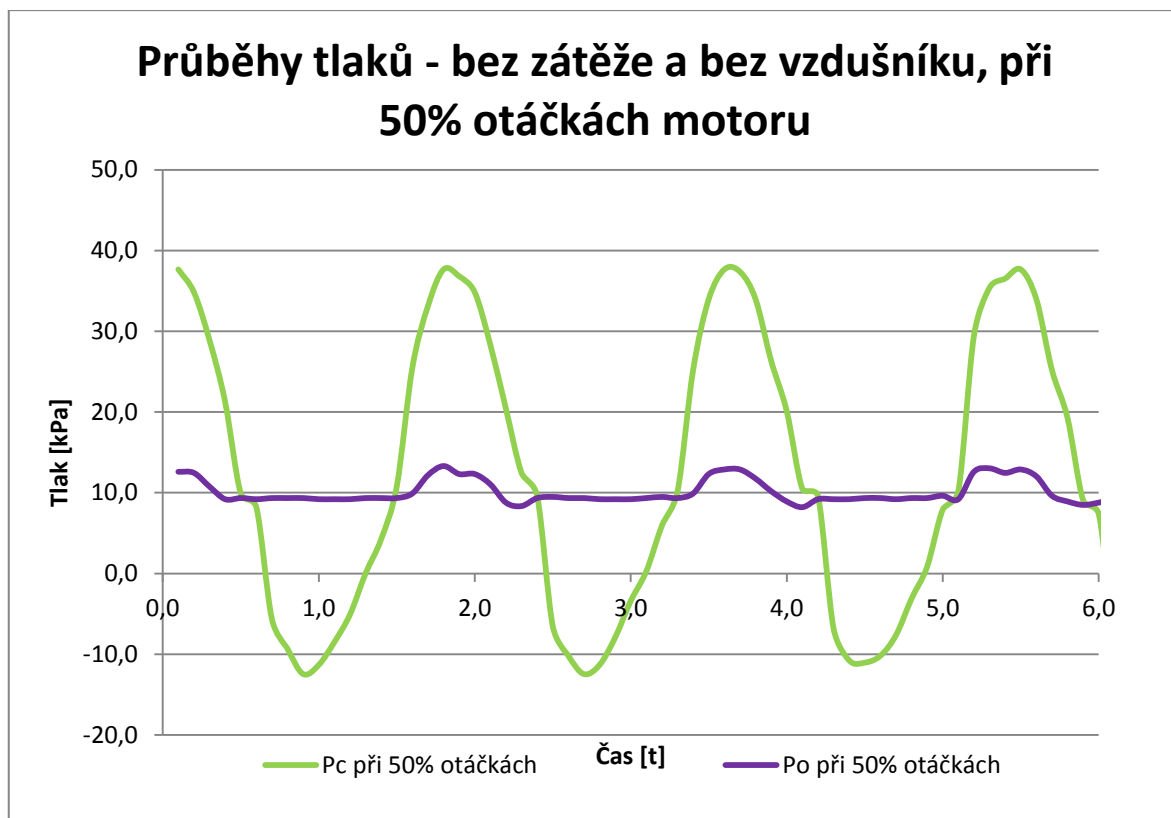
PŘÍLOHY



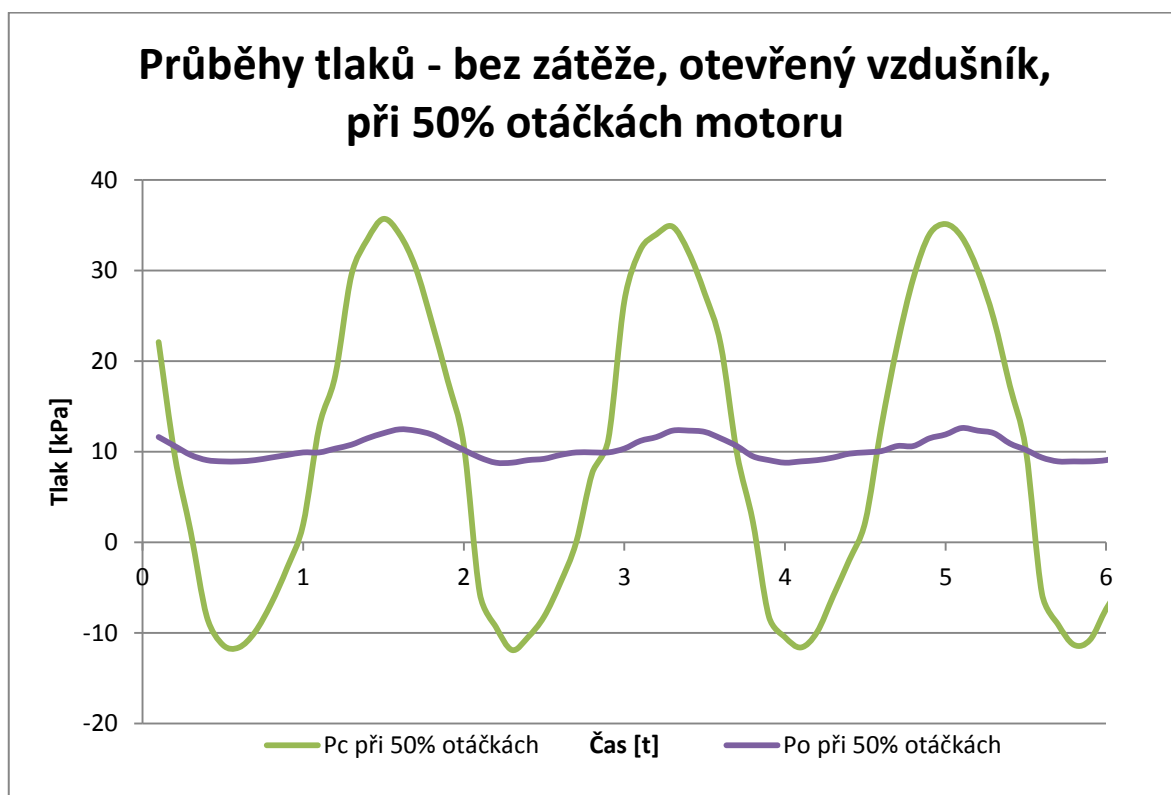
Graf č. 4 – Průběhy tlaků při nulové zátěži v potrubí, bez použití vzdušníku, při 100% ot. motoru



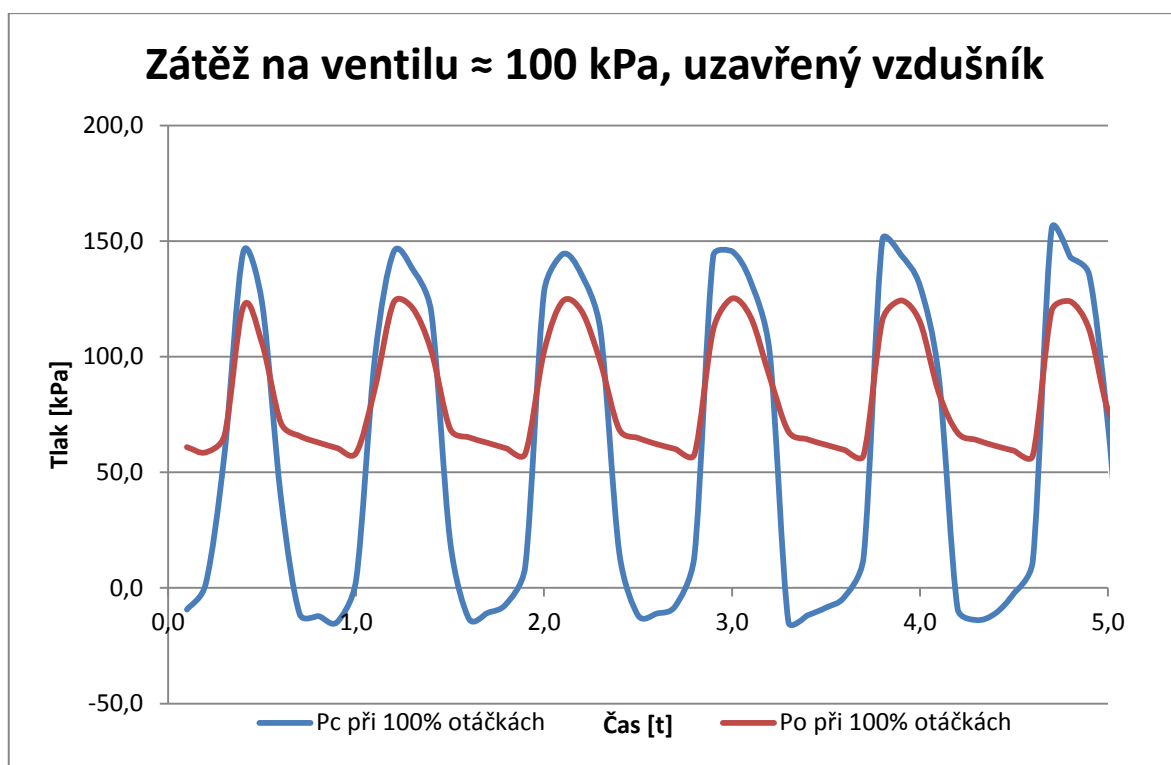
Graf č. 5 – Průběhy tlaků při nulové zátěži v potrubí za použití vzdušníku, při 100% ot. motoru



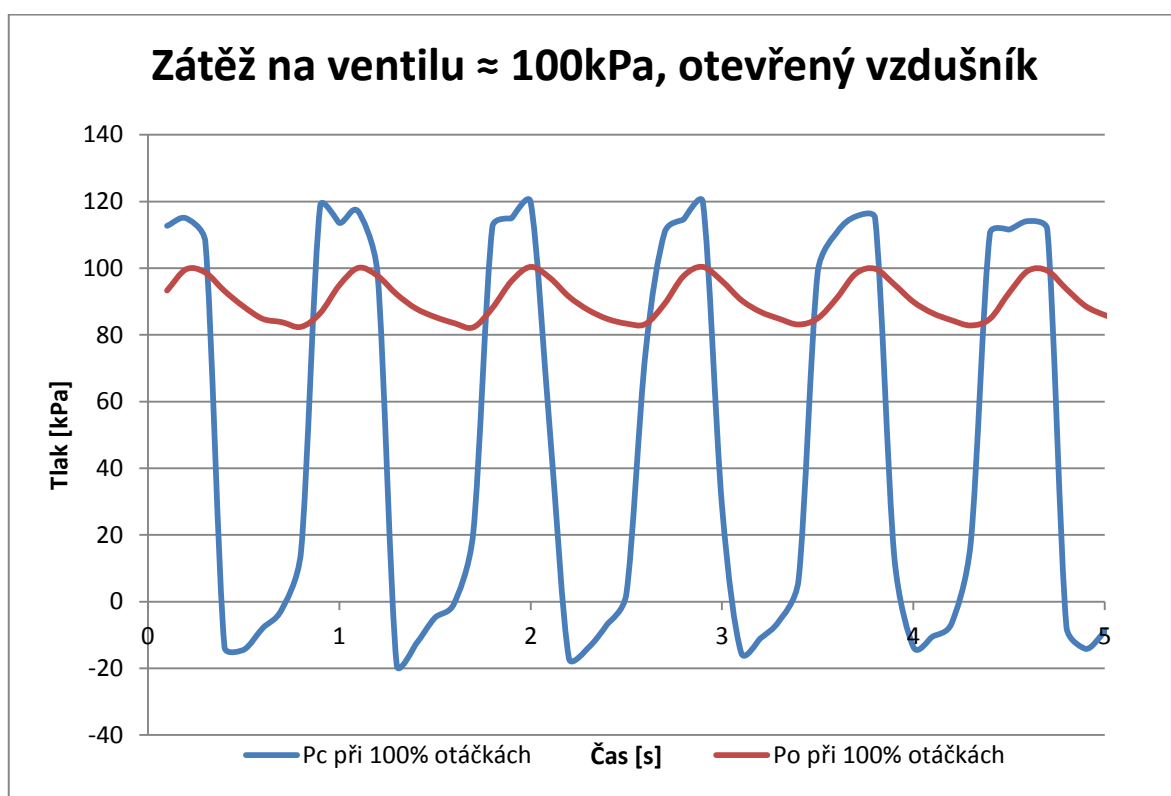
Graf č. 6 – Průběhy tlaků bez zátěže v potrubí, bez použití vzdušníku, při 50% otáčkách motoru



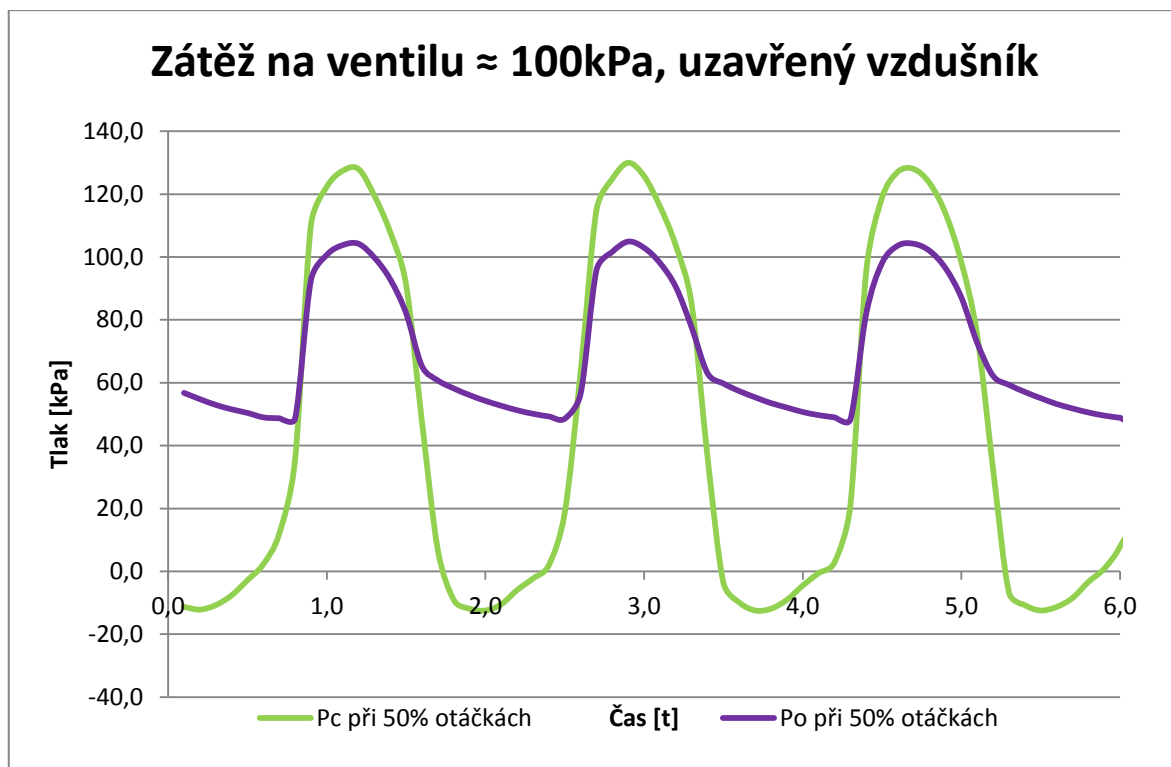
Graf č. 7 – Průběhy tlaků bez zátěže v potrubí, za použití vzdušníku, při 50% otáčkách motoru



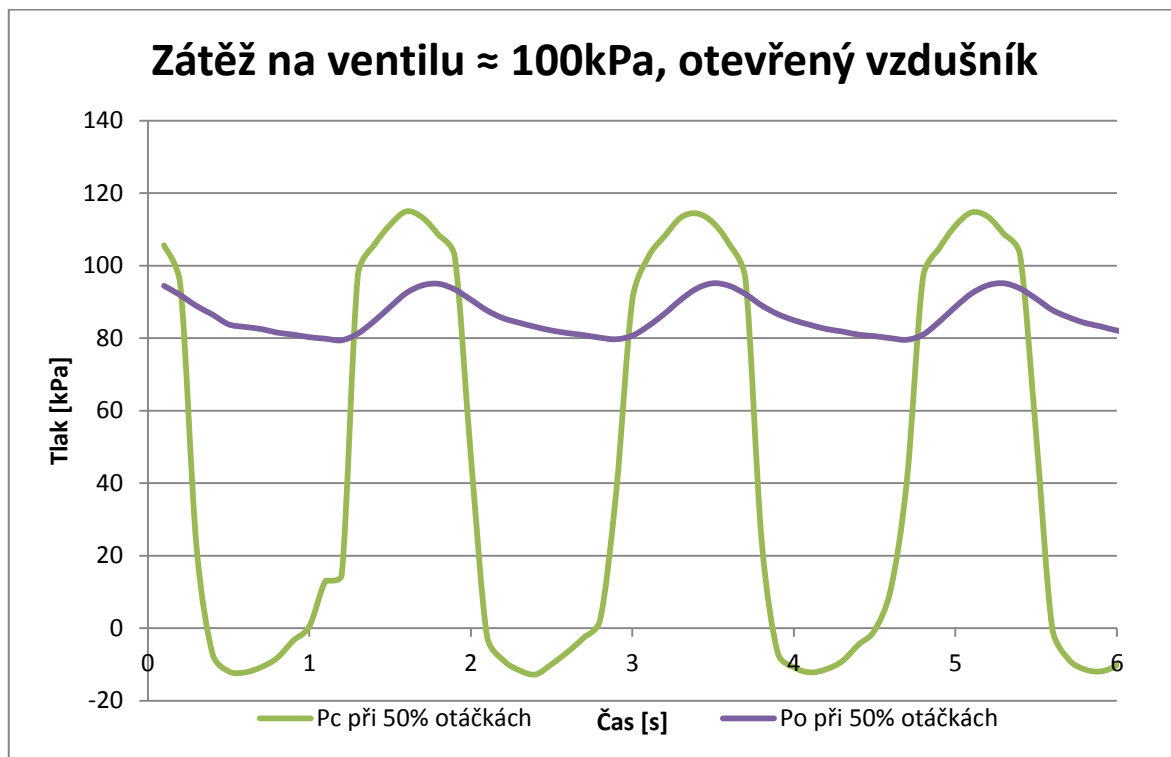
Graf č. 8 – Průběhy tlaků při zátěži 100 kPa, bez použití vzdušníku



Graf č. 9 – Průběhy tlaků při zátěži 100 kPa za použití vzdušníku



Graf č. 10 – Průběhy tlaků při zátěži 100 kPa, bez použití vzdušníku, 50% ot. motoru



Graf č. 11 – Průběhy tlaků při zátěži 100 kPa za použití vzdušníku, 50% ot. motoru